

The International Conference on Defense Technologies & Future Strategies
December 17-20, 2025 Konya, Türkiye

THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEFENSE TECHNOLOGIES AND FUTURE STRATEGIES (SATEGS 25)

**17-20 DECEMBER 2025 KONYA
PROCEEDING BOOK**

Editors

**PROF. DR. SÜLEYMAN NEŞELİ
ASSIST. PROF. DR. HAKAN TERZİOĞLU**

EĞİTİM
yayınevi

THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEFENSE TECHNOLOGIES AND FUTURE STRATEGIES (SATEGS 25) 17-20 DECEMBER 2025 KONYA PROCEEDING BOOK

Editörler: Prof. Dr. Süleyman Neşeli, Dr. Öğr. Üyesi Hakan Terzioğlu

Chairman of the Publishing House Group: Yusuf Ziya Aydoğan (yza@egitimyayinevi.com)

Executive Editor: Yusuf Yavuz (yusufyavuz@egitimyayinevi.com)

Interior Designer: Kübra Konca Nam

Cover Designer: Education Publishing House Design Unit

Turkish Republic Ministry of Tourism and Culture

Publisher Certificate No: 76780

E-ISBN: 978-625-385-732-5

1. Edition, December 2025

Library Information Card

THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEFENSE TECHNOLOGIES AND FUTURE STRATEGIES (SATEGS 25) 17-20 DECEMBER 2025 KONYA PROCEEDING BOOK

Editors: Prof. Dr. Süleyman Neşeli, Dr. Öğr. Üyesi Hakan Terzioğlu

261 s., 210x297 mm

Includes references, no index.

E-ISBN: 978-625-385-732-5

Copyright © All rights for this edition are reserved for Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, including photocopying, electronically or mechanically recording or by any information storage or retrieval system, without permission of Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti.

EĞİTİM

yayınevi

Publisher Türkiye Office: İstanbul: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Atakent mah. Yasemen sok. No: 4/B, Ümraniye, İstanbul, Türkiye

Konya: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye +90 332 351 92 85, +90 533 151 50 42
bilgi@egitimyayinevi.com

Publisher USA Office: New York: Egitim Publishing Group, Inc.
P.O. Box 768/Armonk, New York, 10504-0768, United States of America
americaoffice@egitimyayinevi.com

Logistics and Shipping Center: Kitapmatik Lojistik ve Sevkiyat Merkezi, Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye
sevkiyat@egitimyayinevi.com

Bookstore Branch: Eğitim Kitabevi, Şükran mah. Rampalı 121, Meram, Konya, Türkiye
+90 332 499 90 00
bilgi@egitimkitabevi.com

Internet Sales: www.kitapmatik.com.tr
bilgi@kitapmatik.com.tr

EĞİTİM YAYINEVİ
GRUBU

EĞİTİM
yayınevi

SALON
yayınları

Kitapmatik®
yayınları

kitapmatik
internetdeki kitaplarınız

EĞİTİM
kitabevi

The International Conference on Defense Technologies & Future Strategies
December 17-20, 2025 Konya, Türkiye

Honorary Committee

- Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ, Selçuk University, Türkiye

General Chairs

- Süleyman NEŞELİ, Selçuk University, Türkiye
- Hakan TERZİOĞLU, Selçuk University, Türkiye

Vice Chairs

- Fatih Alpaslan KAZAN, Selçuk University, Türkiye
- Nurettin DOĞAN, Selçuk University, Türkiye
- Selahattin ALAN, Selçuk University, Türkiye
- Osman KOCAASLAN, Selçuk University, Türkiye

Organizing Committee

- Angel Smrikarov, Rouse University, Bulgaristan
- Lilia Georgieva, Heriot Watt University, Birleşik Krallık
- Polyxeni Arapi, Technical University of Greece, Yunanistan
- Fatih Alpaslan KAZAN, Selçuk University, Türkiye
- Tahir SAĞ, Selçuk University, Türkiye
- Silyan Sibinov Arsov, Rouse University, Bulgaristan

Scientific Committee

- Abdullah Cem AĞAÇAYAK, Konya Technical University, Türkiye
- Abdullah Erdal TÜMER, Kırgızistan Türkiye Manas University, Kırgızistan
- Ahmet Afsin KULAKSIZ, Konya Technical University, Türkiye
- Ahmet YÖNETKEN, Afyon Kocatepe University, Türkiye
- Alina Ivan Dramogir, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, Romanya
- Almoataz Youssef Abdelaziz, Ain Shams University, Mısır
- Amar Ramdane Cherif, University of Versailles, Fransa
- Anca Loana Andreescu, Academy of Economic Studies, Bulgaristan
- Alexander Sudnitson, Tallinn University of Technology, Estonya
- Anne Villems, University of Tartu, Estonya
- Antonella Reitano, University of Calabria, İtalya
- Antonio Mendes, Universidade de Coimbra, Portekiz
- Aristomenis Antoniadis, Technical University of Crete, Yunanistan
- Artan Luma, South East European University, Kuzey Makedonya
- Biagio Lenzitti, University of Palermo, İtalya
- Binod Kumar, JSPM Jayawant Institute of Computer Applications Pune, Hindistan
- Boris Akanaev, Kazak National University, Kazakistan
- Domenico Tegolo, Università Degli Studi Di Palermo, İtalya
- Eisha Akanksha, MVJ College of Engineering, Hindistan
- Elinda Kajo Mece, Polytechnic University of Tirana, Romanya
- Engin Özdemir, Kocaeli University, Türkiye
- Fatih Alpaslan KAZAN, Selçuk University, Türkiye
- Gökhan YALÇIN, Konya Technical University, Türkiye

The International Conference on Defense Technologies & Future Strategies
December 17-20, 2025 Konya, Türkiye

- Gabriel Luna Sandoval, Sonora State University, Meksika
- Hamit Saruhan, Düzce University, Türkiye
- Hamza Bensouilah, Laboratoire de Mecanique et Structures, Cezayir
- Hasan Erdiñ KOÇER, Selçuk University, Türkiye
- Hasan OĞUL, Sinop University, Türkiye
- H. Hazel ARAS, Yozgat University, Türkiye
- Howard Duncan, Dublin City University, İrlanda
- Humar KAHRAMANLI ÖRNEK, Selçuk University, Türkiye
- Huse Fatkic, University of Sarajevo, Bosna-Hersek
- İlker Ali ÖZKAN, Selçuk University, Türkiye
- İsmail SARITAŞ, Selçuk University, Türkiye
- Ivan Jelinek, Czech Technical University, Çekya
- Jaharah A Ghani, National University of Malaysia, Malezya
- Jan Vom Brocke, University of Liechtenstein, Lihtenştayn
- Janis Grundspenkis, Riga Technical University, Letonya
- Janusz Jablonowski, Warsaw University, Polonya
- Jiri Srba, Aalborg University, Danimarka
- Karl Jones, Liverpool John Moores University, Birleşik Krallık
- Laurentiu Cristian Deaconu, University of Pitesti, Romanya
- Levent ÖNCEL, Sinop University, Türkiye
- M. Kemal BALKİ, Sinop University, Türkiye
- Mahdi Shahbakhti, Michigan Technology University, ABD
- Majida Ali Abed Meshari, Tikrit University, Irak
- Marco Porta, University of Pavia, İtalya
- Mehmet Turan Demirci, Selçuk University, Türkiye
- Mirjana Ivanovic, University of Novi Sad, Sırbistan
- Miroslav Neslusan, University of Zilina, Slovakya
- Mustafa ACARER, Selçuk University, Türkiye
- Mustafa Altın, Konya Technical University, Türkiye
- Mustafa Can CANOĞLU, Sinop University, Türkiye
- Mustafa KARAKAYA, Sinop University, Türkiye
- Natasa Hoic Bozic, University of Rijeka, Hırvatistan
- Necaattin BARIŞÇI, Gazi University, Türkiye
- Nihat Yıldırım, Gaziantep University, Türkiye
- Nikolaos Blasis, Technical University of Crete, Yunanistan
- Olcay Ilcasu, Rowan University, ABD
- Osman Ayhan ERDEM, Gazi University, Türkiye
- Pantha Ghosal, University of Technology Sydney, Avustralya
- Pino Caballero Gil, University of La Laguna, İspanya
- Polyxeni Arapi, Technical University of Greece, Yunanistan
- Recai KUŞ, Selçuk University, Türkiye
- Rita Ismailova, Kyrgyz Turkish Manas University, Kırgızistan
- Salih DAĞLI, Sinop University, Türkiye
- Semet Çelik, Atatürk University, Türkiye

The International Conference on Defense Technologies & Future Strategies
December 17-20, 2025 Konya, Türkiye

- Silyan Sibinov Arsov, Rousse University, Bulgaristan
- Spiridon Cretu, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, Romanya
- Stavros Christodoulakis, Technical University of Crete, Yunanistan
- Stavros Nikolopoulos, University of Ioannina, Yunanistan
- Tatjana Dulinskiene, Kaunas University of Technology, Litvanya
- Tayfun Fındık, Gazi University, Türkiye
- Temel Kayıkcıoğlu, Karadeniz Technical University, Türkiye
- Tuba Gökhan, Mohamed bin Zayed University of Artificial Intelligence, BAE
- Thomas Engel, University of Luxembourg, Lüksemburg
- Tuğçe Demirdelen, Adana Science Technology University, Türkiye
- Ülkü Sultan Keskin, Konya Technical University, Türkiye
- Ulvi Şeker, Gazi University, Türkiye
- Yuri Pavlov, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaristan
- Yusuf Çağlar Kağıtçı, Konya Technical University, Türkiye
- Yusuf ERYESİL, Selçuk University, Türkiye
- Zarifa Jabrayilova, Institute of Information Technology Anas, Azerbaijan

Local Organizing Committee

- Yusuf ERYESİL, Selçuk University, Türkiye
- Ramazan BARAN, Selçuk University, Türkiye
- H. Hazel ARAS, Yozgat University, Türkiye
- Rümeyza BAY, Selçuk University, Türkiye
- Enes Arda BAL, Selçuk University, Türkiye
- Yusuf NURDOĞDU, Selçuk University, Türkiye
- Elif Sude SİPER, Selçuk University, Türkiye
- Aslı VARLI, Selçuk University, Türkiye
- Sevim Sude BAL, Selçuk University, Türkiye

The International Conference on Defense Technologies & Future Strategies
December 17-20, 2025 Konya, Türkiye

Evrak Tarih ve Sayısı: 11.11.2025-E.1122950



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
Personel Daire Başkanlığı



Sayı : E-97391123-900-1122950
Konu : SATEGS 25 Sempozyum
Görevlendirilmesi

11.11.2025

TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ DEKANLIĞINA

İlgi : 05.11.2025 tarihli ve E-18398983-051-1122015 sayılı yazınız.

Üniversitemiz ile Sinop Üniversitesi tarafından 17-20 Aralık 2025 tarihleri arasında gerçekleştirilecek olan "The International Conference on Defense Technologies and Future Strategies (SATEGS 25)" isimli sempozyumda, Fakülteniz Öğretim Üyeleri Prof.Dr.Süleyman NEŞELİ ve Dr.Öğr.Üyesi Hakan TERZİOĞLU'nun, akademisyen temsilcisi olarak görevlendirilmeleri uygun görülmüştür.

Gereğini rica ederim.

Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ
Rektör

Bu belge, güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.

Belge Doğrulama Kodu : *BS477Y0P93* Pin Kodu : 01342

Belge Takip Adresi : <https://www.turkiye.gov.tr/selcuk-universitesi-ebys>

Adres : Akademi Mahallesi Yeni İstanbul Caddesi No:369/1 P.K:42130 Selçuklu-KONYA

Telefon : 0332 223 84 07 Faks : 0332 223 80 33

e-Posta: personel@selcuk.edu.tr Web: <http://www.personel.selcuk.edu.tr/>

Kep Adresi : selcukuniversitesi@hs01.kep.tr

Bilgi için : Mehmet İLDIRIM

Unvanı : Teknisyen

Tel No : 03322238042



TABLE OF CONTENTS

<i>Laser Melting (SLM) ile Üretilen Metal Parçalarda Defekt Oluşum Mekanizmaları ve Mikroyapıya Etkileri: Teorik Bir Derleme</i>	<i>138</i>
<i>Autonomous Navigation and Obstacle Detection in Unmanned Ground Vehicles.....</i>	<i>90</i>
<i>Controlling Unmanned Ground Vehicles with Hand Gestures.....</i>	<i>66</i>
<i>Intelligent Propulsion Control Software in Electric Military Vehicles.....</i>	<i>57</i>
<i>Uyarlamalı Denetim Algoritmalarının Kararlılık Analizi</i>	<i>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</i>
<i>A Theoretical Study on Composite Fiber Production Using rPET.....</i>	<i>68</i>
<i>Applications and Future Uses of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) in the Defense Industry.....</i>	<i>39</i>
<i>Makine Öğrenmesi Tabanlı İHA Tespit ve Karşı Tedbir Sistemleri: Lazer ve Elektromanyetik Yöntemlerle Entegre Akıllı Savunma Yaklaşımı</i>	<i>145</i>
<i>Otonom Tespit Robotu ile Saha Taraması ve Tehdit Tespiti.....</i>	<i>5</i>
<i>Yangınla Mücadelede Yapay Zeka Desteği: Teorik ve Yazılımsal Bir İnceleme.....</i>	<i>74</i>
<i>Artificial Intelligence–Based Data Compression in Edge Computing Environments: A Conceptual Design.....</i>	<i>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</i>
<i>DQN-Based Adaptive Scheduling under Multi-Dimensional Network Conditions.....</i>	<i>12</i>
<i>Yapay Zeka Tabanlı Cihaz Kestirimci Bakımı: Teorik ve Yazılımsal Bir İnceleme</i>	<i>33</i>
<i>Savunma Sanayi Sektöründe Kullanılan Başlıca Malzemelerin İşlenebilirliği Üzerine Bir Literatür Taraması.....</i>	<i>151</i>
<i>Visualizing Model Attention in SAR-Based Military Target Classification.....</i>	<i>Dijital Hareketli Harita Sistemlerinde</i>
<i>Yapay Zeka Tabanlı İHA/UAV Rota Optimizasyonu</i>	<i>cxvii</i>
<i>Savaş Alanında Durumsal Farkındalık için Yapay Zeka Destekli Veri Füzyonu</i>	<i>xcvi</i>
<i>Termal Görüntüleme Verileri için Uç Cihazlarda Derin Öğrenme Tabanlı Nesne Tespiti</i>	<i>19</i>
<i>Elektronik Harp Teknolojisi.....</i>	<i>cvi</i>
<i>Hibrit ve Tam Elektrikli Paletli Zırhlı Araçlarda Enerji Yönetimi ve Kontrol Algoritmaları.....</i>	<i>17</i>
<i>Otonom Kara Taşıtlarında Elektrikli Tahrik ve Yazılım Entegrasyonu: Enerji Yönetimi, Yüksek Güçlü Sensörler ve Komuta-Kontrol Sistemleri</i>	<i>10</i>
<i>Automatic 3D Road Network Modeling from Satellite Imagery: A Deep Learning-Based Hybrid Approach.....</i>	<i>83</i>
<i>A Comparative Review of Electro-Hydrostatic Actuators Within the Scope of Electric Aircraft Technologies.....</i>	<i>40</i>
<i>Target Detection from Images.....</i>	<i>27</i>
<i>The Effects of Portable Electric Vehicle Charging Stations on Defense Mobility in Critical Mission Areas.....</i>	<i>cxvii</i>
<i>Görüntü İşleme ile Çoklu Renk Takibi ve Otonom Platformlar için 3 Boyutlu Uzaklık Hesaplama Yöntemi</i>	<i>25</i>
<i>Otonom Su Altı Araçlarında Gerçekçi Hidrodinamik Koşullar Altında Rota Tabanlı Rota Planlama Performans Analizi</i>	<i>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</i>
<i>Otonom Sürü Teknolojileri ve Modern Harpte Dönüşüm.....</i>	<i>47</i>
<i>Modern AESA Radar Sistemlerinin Tasarımı: Mimari Yapı, Beamforming, Termal Yönetim ve Elektronik Harp Dayanımı.....</i>	<i>75</i>

ARTIFICIAL INTELLIGENCE–BASED DATA COMPRESSION IN EDGE COMPUTING ENVIRONMENTS: A CONCEPTUAL DESIGN

Keziban KARAGÜMÜŞ^{1*}

^{1*}Department of Computer Engineering, Selçuk University Institute of Science, Selçuklu, Konya

258273001002@ogr.selcuk.edu.tr¹

Abstract – This study addresses the efficient processing of high-volume image, video, and time-series data generated by sensors, smart devices, and embedded systems in edge computing environments through artificial intelligence–based compression algorithms. The increasing data volume, bandwidth constraints, latency requirements, and energy consumption indicate that classical lossy and lossless compression methods are not sufficient for every scenario in modern applications. In recent years, deep learning–based autoencoders, asymmetric encoder–decoder architectures, attention mechanisms, and task-oriented compression approaches have enabled both higher compression ratios and the preservation of application-specific critical information. In this study, AI-based lossy and lossless compression approaches are examined within the context of edge–fog–cloud architectures, and a holistic framework that jointly considers data and model compression is presented. Recent studies published in the last five years are systematically reviewed, and their common trends and limitations are discussed. Furthermore, considering the limited memory, computational power, and energy resources of edge devices, a conceptual AI-based compression system is proposed that incorporates data-type awareness and error-bounded hybrid channels. This work does not present an experimental implementation; rather, it constitutes a literature-based investigation and system design, providing a foundational framework for future applied studies.

Keywords – Artificial Intelligence–Based Compression; Edge Computing; Data Compression; Model Compression; Task-Aware Compression

INTRODUCTION

Modern communication and computing infrastructures are increasingly fed by high-volume data generated by a growing number of sensors, smart devices, and embedded systems. Applications such as the Internet of Things (IoT), smart grids, autonomous vehicles, medical imaging systems, unmanned aerial vehicles, and industrial automation produce continuously streaming data flows that often need to be processed in near real time. A large portion of these data consists of images, videos, time series, or high-dimensional measurement vectors, and storing or transmitting them in raw form over networks incurs significant bandwidth, latency, and energy costs.

In this context, data compression algorithms play a critical role in reducing communication overhead, lowering storage costs, and enabling more efficient utilization of the limited hardware resources of edge devices. Classical lossy and lossless compression methods (e.g., Huffman coding, LZ-based algorithms, JPEG/JPEG2000, wavelet transforms) have produced successful results in many applications over the years. However, the increasing diversity of data, the differentiation of application-specific quality-of-service requirements, and the widespread adoption of edge computing architectures have revealed that these methods are not sufficient for every scenario.

In recent years, artificial intelligence—particularly deep learning–based approaches—has led to a significant paradigm shift in the field of data compression. Autoencoders, asymmetric encoder–decoder structures, attention mechanisms, and Transformer architectures are capable of learning data statistics to generate application-specific representations and can achieve superior rate–distortion performance compared to classical methods [7][10]. For instance, studies that jointly address the classification and compression of medical images have demonstrated that the use of class-specific

compressors yields significant improvements over traditional JPEG/JPEG2000 methods [13]. Similarly, the real-time compression of high-frequency measurement data in power systems both reduces transmission latency and lowers the energy consumption of edge devices [22].

On the other hand, devices operating in edge environments often have limited processing power, memory capacity, and energy resources. Therefore, it is not sufficient for compression algorithms to achieve high compression ratios alone; they must also exhibit low computational complexity, predictable latency, and compatibility with hardware constraints. This has brought memory-aware model compression and joint model–data compression approaches to the forefront [3][23]. This study aims to examine AI-based compression approaches suitable for edge environments from a literature-driven perspective and, based on these approaches, to propose a holistic system design.

MATERIALS AND METHOD

This study is not based on an experimental hardware setup or the creation of a new dataset; instead, it examines artificial intelligence–based compression approaches used in edge computing environments through a literature-driven, systematic, and solution-oriented methodology. The methodological framework consists of two main components: (i) an analysis of the recent literature, and (ii) the design of a conceptual compression system guided by the findings reported in the literature.

In the first stage, studies published between 2020 and 2025 that focus on AI-based compression of sensor data, images, videos, and time-series signals are examined in detail. These studies are evaluated in terms of the compression approach employed (lossy, lossless, hybrid), architectural structure (autoencoders, asymmetric encoder–decoder models, Transformer-based architectures), application domain, and suitability for edge environments. Performance metrics reported in the literature—such as compression ratio, reconstruction quality, latency, and energy consumption—are comparatively analyzed.

In the second stage, a conceptual AI-based compression system built upon an edge–fog–cloud architecture is considered based on the insights obtained from the literature. In the proposed approach, the compression process is structured as a multi-stage pipeline. First, the type of data generated by the sensor is identified; subsequently, an AI-based lossy compression method appropriate for the data type is applied. At this stage, asymmetric autoencoders, task-oriented compression, and error-bounded approaches form the core design principles. In the subsequent stages, lightweight entropy coding techniques suitable for edge devices and, when necessary, lossless complementary channels are employed to enhance overall compression performance [11][3].

Furthermore, the necessity of adapting not only the data but also the AI model performing the compression to edge environments is taken into account. In this context, model compression techniques such as pruning, quantization, and memory-aware learning are methodologically evaluated [23]. This study does not provide experimental validation of the proposed system; rather, it presents a theoretical and methodological framework through literature analysis and conceptual system design.

PROPOSED CONCEPTUAL SYSTEM DESIGN

Based on the findings reported in the literature, this study proposes a conceptual artificial intelligence–based compression method designed to operate within an edge–fog–cloud architecture. Rather than employing a single universal compressor for heterogeneous data types, the proposed approach adopts a data-type–aware adaptive selection strategy and is structured as a multi-stage compression pipeline that explicitly accounts for the constraints of edge devices.

A) Stage 1: Data Type Identification and Task Definition (Edge)

In the first step, the type of data generated by the sensor is identified (e.g., image/video, time series, medical images, multichannel measurements). The objective of this step is to enhance the compatibility between the compression model and the data statistics, as emphasized in the literature,

since a single model is not expected to deliver optimal performance across all data types [13]. At this stage, application requirements—such as latency tolerance, error bounds, and task-critical information—are also defined.

B) Stage 2: Preprocessing (Edge)

Depending on the data type, lightweight preprocessing operations such as normalization, noise reduction, and sampling adjustment are applied. This step aims to ensure more stable model behavior and to reduce error accumulation after compression.

C) Stage 3: AI-Based Lossy Compression (Edge)

The core component of the proposed method is an AI-based lossy compressor tailored to the specific data type. In this context, the selection logic is aligned with approaches that have gained prominence in the literature, including:

asymmetric autoencoders with optionally pruned subcomponents for image/video data,
predictive models combined with error-controlled representation learning for time-series data, and quality-preserving structures for medical projections and similarly critical imagery [7][18].

The objective here is not solely to improve quality metrics such as PSNR or SSIM, but to balance rate–distortion–latency–energy trade-offs under edge constraints [19].

D) Stage 4: Error-Bound Control and Hybrid Complementary Channel (Edge)

After lossy compression, the reconstruction error is evaluated against application-specific thresholds. If the error exceeds the defined limit, either (i) the model parameters/compression ratio are adjusted, or (ii) a hybrid channel that generates residual or complementary information for critical regions is activated. This approach is consistent with error-bounded methods aimed at preserving task-critical information in edge environments [11][22].

E) Stage 5: Edge-Friendly Entropy Coding and Transmission

The compressed representation is further reduced at the bit level using low-overhead entropy coding techniques suitable for edge devices (e.g., bit-packing, fast LZ4-like methods). The resulting data are then transmitted to the fog/edge gateway or cloud layer [11][22].

F) Stage 6: Fog Layer – Quality Verification and Task-Oriented Control

At the fog layer, a rapid quality assessment of the compressed data is performed, and task-oriented validation (e.g., anomaly detection, quality control) is applied when necessary. This intermediate processing enables early detection of erroneous or incomplete packets before transmission to the cloud.

G) Stage 7: Cloud Layer – Full Reconstruction and Model Update

At the cloud layer, computationally intensive enhancement and reconstruction operations (e.g., super-resolution or restoration techniques) and long-term storage are carried out. In addition, model update and retraining strategies are addressed at this layer to ensure system sustainability.

Note (Nature of the Study):

The proposed method constitutes a conceptual system design developed through literature analysis and has not been experimentally implemented or evaluated at this stage. Its primary objective is to

provide a methodological framework that can be directly transferred to future applied studies.

RESULTS AND DISCUSSIONS

In this study, artificial intelligence-based compression approaches used in edge computing environments are examined from a literature-driven and system-level perspective. The reviewed studies indicate that classical compression methods remain limited in terms of bandwidth and energy efficiency in edge environments, whereas AI-based approaches offer more adaptive and task-aware solutions. In particular, autoencoder-based and asymmetric encoder-decoder architectures have been shown to achieve high compression ratios with acceptable reconstruction quality for image and time-series data.

The findings in the literature suggest that evaluating compression performance solely through rate-distortion metrics is insufficient; system-level metrics such as latency, energy consumption, and hardware compatibility are at least as critical as reconstruction quality. In this context, holistic approaches that jointly address data compression and model compression emerge as essential for edge computing applications [3][23].

The proposed conceptual system emphasizes performing compression as close as possible to the data generation point, employing data-type-aware adaptive compression strategies, and applying error-bounded hybrid structures. This approach is consistent with the findings reported in the literature in terms of reducing network traffic, lowering latency, and improving energy efficiency. Nevertheless, the lack of experimental validation constitutes a fundamental limitation of this study. Future work will focus on implementing the proposed architecture on real edge hardware platforms, evaluating it through quantitative performance measurements, and optimizing task-oriented compression strategies as key research directions.

REFERENCES

- [1] V. W. Anelli, Y. Deldjoo, T. Di Noia, and D. Malitesta, "Deep Learning-Based Adaptive Image Compression System for a Real-World Scenario," (in English), *Ieee Conf Evol Adapt*, 2020, doi: 10.1109/eais48028.2020.9122753.
- [2] Z. X. Chang et al., "Deep learning-based super-resolution method for projection image compression in radiotherapy," (in English), *Quant Imag Med Surg*, vol. 15, no. 9, Sep 2025, doi: 10.21037/qims-2024-2962.
- [3] Y. Ding, W. W. Fang, M. R. Liu, M. Wang, Y. S. Cheng, and N. X. Xiong, "JMDC: A joint model and data compression system for deep neural networks collaborative computing in edge-cloud networks," (in English), *J Parallel Distr Com*, vol. 173, pp. 83-93, Mar 2023, doi: 10.1016/j.jpdc.2022.11.008.
- [4] S. W. Fang et al., "Optimizing Intelligent Edge-clouds with Partitioning, Compression and Speculative Inference," (in English), *Ieee Milit Commun C*, 2021, doi: 10.1109/Milcom52596.2021.9653126.
- [5] A. K. Idrees, S. K. Idrees, R. Couturier, and T. Ali-Yahiya, "An Edge-Fog Computing-Enabled Lossless EEG Data Compression With Epileptic Seizure Detection in IoMT Networks," (in English), *Ieee Internet Things*, vol. 9, no. 15, pp. 13327-13337, Aug 1 2022, doi: 10.1109/Jiot.2022.3143704.
- [6] Y. Inazu and H. Kimata, "Deep Learning-based RGBA Image Compression with Masked Window-based Attention," (in English), *Ite Trans Media Tech*, vol. 13, no. 2, pp. 200-210, 2024. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:001461512300001.
- [7] J. H. Kim, J. H. Choi, J. Chang, and J. S. Lee, "Efficient Deep Learning-Based Lossy Image Compression Via Asymmetric Autoencoder and Pruning," (in English), *Int Conf Acoust Spee*, pp. 2063-2067, 2020, doi: 10.1109/icassp40776.2020.9053102.
- [8] B. L. Li, M. Akbari, J. Liang, and Y. Wang, "Deep Learning-based Image Compression with Trellis Coded Quantization," (in English), *Ieee Data Compr Conf*, pp. 13-22, 2020, doi: 10.1109/Dcc47342.2020.00009.
- [9] H. H. Liu et al., "Deep Learning-Based Picture-Wise Just Noticeable Distortion Prediction Model for Image Compression," (in English), *Ieee T Image Process*, vol. 29, pp. 641-656, 2020, doi: 10.1109/Tip.2019.2933743.
- [10] Z. B. Liu, M. K. Wang, F. Chen, and Q. Lu, "Edge-Assisted Intelligent Video Compression for Live Aerial

- Streaming," (in English), *Ieee T Green Commun*, vol. 6, no. 3, pp. 1613-1623, Sep 2022, doi: 10.1109/Tgcn.2022.3172900.
- [11] S. F. Lu, Q. H. Xia, X. L. Tang, X. Y. Zhang, Y. P. Lu, and J. K. She, "A Reliable Data Compression Scheme in Sensor- Cloud Systems Based on Edge Computing," (in English), *Ieee Access*, vol. 9, pp. 49007-49015, 2021, doi: 10.1109/Access.2021.3068753.
- [12] V. Makarichev, V. Lukin, O. Illiashenko, and V. Kharchenko, "Digital Image Representation by Atomic Functions: The Compression and Protection of Data for Edge Computing in IoT Systems," (in English), *Sensors-Basel*, vol. 22, no. 10, May 2022, doi: ARTN 3751 10.3390/s22103751.
- [13] Z. Nusrat, M. F. Mahmud, and W. D. Pan, "Efficient Compression of Red Blood Cell Image Dataset Using Joint Deep Learning-Based Pattern Classification and Data Compression," (in English), *Electronics-Switz*, vol. 14, no. 8, Apr 11 2025, doi: ARTN 1556 10.3390/electronics14081556.
- [14] V. Palani, T. Thanarajan, A. Krishnamurthy, and S. Rajendran, "Deep Learning Based Compression with Classification Model on CMOS Image Sensors," (in English), *Trait Signal*, vol. 40, no. 3, pp. 1163-1170, Jun 2023, doi: 10.18280/ts.400332.
- [15] L. X. Peng, W. Bo, H. Q. Yang, and X. Y. Li, "Deep learning-based image compression for enhanced hyperspectral processing in the protection of stone cultural relics," (in English), *Expert Syst Appl*, vol. 271, May 1 2025, doi: ARTN 126691 10.1016/j.eswa.2025.126691.
- [16] O. M. Salih and J. Vászrhelyi, "Visual Data Compression Approaches for Edge-based ORB-VSLAM Systems," (in English), 2024 25th International Carpathian Control Conference, *Iccc 2024*, 2024, doi: ArtN 99 10.1109/Iccc62069.2024.10569696.
- [17] M. Singh, N. Baranwal, K. N. Singh, A. K. Singh, and H. Y. Zhou, "Deep learning-based biometric image feature extraction for securing medical images through data hiding and joint encryption-compression," (in English), *J Inf Secur Appl*, vol. 79, Dec 2023, doi: ARTN 103628 10.1016/j.jisa.2023.103628.
- [18] M. Stroot, S. Seiler, P. Lutat, and A. Ulbig, "An AI-based, Error-bounded Compression Scheme for High-frequency Power Quality Disturbance Data," (in English), *Smart Energy Sys Tec*, 2024, doi: 10.1109/Sest61601.2024.10694355.
- [19] B. Wang, Y. Q. Liu, G. C. Shou, and Y. H. Hu, "Energy Consumption Minimization using Data Compression in Mobile Edge Computing," (in English), *Ieee Int Conf Commun*, pp. 911-916, 2020, doi: 10.1109/icc649849.2020.9238837.
- [20] I. H. Wang and J. J. Ding, "Deep Learning Based EBCOT Source Symbol Prediction Technique for JPEG2000 Image Compression Architecture," (in English), *Ieee I C Vi Com I Pr*, pp. 226-229, 2020, doi: 10.1109/vcip49819.2020.9301822.
- [21] H. Yang et al., "Deep learning-based X-ray computed tomography image reconstruction and prediction of compression behavior of 3D printed lattice structures," (in English), *Addit Manuf*, vol. 54, Jun 2022, doi: ARTN 102774 10.1016/j.addma.2022.102774.
- [22] J. H. Yang et al., "Real-Time D-PMU Data Compression for Edge Computing Devices in Digital Distribution Networks," (in English), *Ieee T Power Syst*, vol. 39, no. 4, pp. 5712-5725, Jul 2024, doi: 10.1109/Tpwr.2023.3335282.
- [23] B. W. Yao, L. S. Liu, Y. Peng, and X. Y. Peng, "Intelligent Measurement on Edge Devices Using Hardware Memory-Aware Joint Compression Enabled Neural Networks," (in English), *Ieee T Instrum Meas*, vol. 73, 2024, doi: ArtN 2501213 10.1109/Tim.2023.3341126.
- [24] J. J. Zha, A. G. Teng, X. W. Shan, H. Tang, and Z. H. Liu, "Application of Deep Learning-Based Image Compression Restoration Technology in Power System Unstructured Data Management," (in English), *Int J Adv Comput Sc*, vol. 16, no. 6, pp. 68-77, 2025. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:001591617700001.
- [25] H. Zhang, S. X. Nan, Z. H. Liu, J. Yang, and X. F. Feng, "Lossless and lossy remote sensing image encryption-compression algorithm based on DeepLabv3+and 2D CS," (in English), *Appl Soft Comput*, vol. 159, Jul 2024, doi: ARTN 111693 10.1016/j.asoc.2024.111693.

DQN-BASED ADAPTIVE SCHEDULING UNDER MULTI-DIMENSIONAL NETWORK CONDITIONS

Keziban KARAGÜMÜŞ^{1*}

¹Department of Computer Engineering, Selçuk University Institute of Science, Selçuklu, Konya
(258273001002@ogr.selcuk.edu.tr)

Abstract – In modern communication and computing systems, the increasing user density, heterogeneous traffic patterns, and time-varying channel conditions have transformed the scheduling problem into a multi-dimensional and dynamic optimization process. In particular, the widespread adoption of delay-sensitive applications necessitates that resource allocation mechanisms prioritize service requirements (Quality of Service, QoS) rather than focusing solely on efficiency or fairness. In this context, traditional scheduling algorithms are insufficient to adapt to rapidly changing network conditions in real time. In this study, a Deep Reinforcement Learning (DRL)-based scheduling approach is proposed, which simultaneously considers traffic models, channel conditions, and service requirements. Within the proposed framework, a Deep Q-Network (DQN) agent with a discrete action space is designed and trained in a Python-based simulation environment. The simulation environment is modeled to incorporate time-varying traffic loads, stochastic channel gains, and flow-specific deadline constraints. At each time step, the agent observes the system state and allocates resources to an appropriate user, learning a policy aimed at minimizing deadline violations. The performance of the proposed DRL-based scheduler is evaluated in comparison with the Earliest Deadline First (EDF) and Weighted Fair Queueing (WFQ) algorithms. Experimental results demonstrate that, under the considered simulation scenario, the DQN-based scheduler reduces deadline violations by approximately 80% compared to classical methods. These findings indicate that the proposed approach provides a strong alternative for applications with strict delay sensitivity.

Keywords – Scheduling Optimization; Deep Reinforcement Learning; DQN; Qos; Resource Allocation

INTRODUCTION

Today's communication and computing infrastructures are becoming increasingly complex due to the growing number of users, the diversification of application types, and time-varying connection conditions. In modern systems such as mobile communication networks, the Internet of Things (IoT), Time-Sensitive Networking (TSN), and edge computing, a large number of traffic flows simultaneously compete for limited resources. In this context, one of the most critical mechanisms determining system performance is scheduling, which refers to the decision-making process that determines which user or flow accesses resources, at what time, and under what conditions.

Traditional scheduling algorithms are typically designed based on fixed rule-based mechanisms. While Earliest Deadline First (EDF) focuses on delay and deadline requirements, Weighted Fair Queueing (WFQ) aims to ensure fair resource sharing among users. Although these methods yield satisfactory performance in specific scenarios, they lack sufficient adaptability in modern network environments where traffic loads vary over time, channel conditions are uncertain, and service requirements are heterogeneous. In particular, for delay-sensitive applications, scheduling decisions based on static rules can lead to significant performance degradation.

In recent years, artificial intelligence and machine learning-based approaches have emerged as powerful alternatives for overcoming these limitations. In particular, Deep Reinforcement Learning (DRL) enables the learning of optimal decision policies through interaction with the environment, allowing systems to adapt to dynamic and uncertain conditions. DRL-based scheduling approaches can generate resource allocation decisions by considering not only the instantaneous system state but also long-term performance objectives.

However, a large portion of the existing literature addresses the components of the scheduling problem in isolation. Traffic intensity, channel conditions, and service requirements are often modeled separately, and their simultaneous and interactive nature is not sufficiently considered. In modern networks, however, the effectiveness of scheduling decisions is directly dependent on the joint evaluation of these three components.

In this study, an integrated scheduling approach is presented that combines traffic models, channel conditions, and service requirements within a unified observation space and employs a deep reinforcement learning-based decision mechanism. A Deep Q-Network (DQN)-based agent is trained in a dynamic simulation environment to learn an optimal scheduling policy. The performance of the proposed approach is evaluated through comparative analysis with classical EDF and WFQ algorithms, and the resulting improvements—particularly in terms of deadline violation reduction—are demonstrated.

From this perspective, the study aims to provide an adaptive and QoS-oriented solution to the multi-dimensional scheduling problems encountered in modern communication and computing systems.

MATERIALS AND METHOD

The scheduling approach proposed in this study is based on the interaction between a deep reinforcement learning-based agent and a simulation environment. The objective is to develop an adaptive scheduling mechanism capable of simultaneously observing traffic behavior, channel conditions, and service requirements, and performing resource allocation according to this multi-dimensional system state. To this end, the system is implemented using a Python-based modular software architecture.

1. SYSTEM ARCHITECTURE AND SIMULATION ENVIRONMENT

The proposed system is based on the classical agent-environment interaction loop of reinforcement learning. The simulation environment is designed to incorporate all dynamics that influence scheduling decisions. At each time step, traffic generation, channel conditions, and packet-specific service requirements are updated, and the agent observes this information to make scheduling decisions.

In the simulation environment, separate queues are defined for each user. Traffic generation is stochastically modeled using user-specific parameters, enabling the system to capture time-varying load fluctuations. In this way, bursty traffic patterns, imbalanced load distributions, and inter-user heterogeneity are realistically represented.

Channel conditions are modeled using stochastic channel gains that are updated at each time step. This modeling approach allows the effects of fading and interference—commonly encountered in wireless networks—to be reflected in the scheduling decisions. Variations in channel quality cause the same resource to yield different efficiencies for different users, making channel state a critical decision parameter for the agent.

Within the scope of service requirements, a deadline constraint is assigned to each packet. As the waiting time of packets in the queue increases, approaching or violating the deadline directly affects the reward received by the agent, thereby influencing the learned scheduling policy.

2. DEEP REINFORCEMENT LEARNING-BASED SCHEDULER

The agent responsible for making scheduling decisions is designed using a Deep Q-Network (DQN) architecture. DQN is selected as an appropriate method for this study due to its proven effectiveness in problems with discrete action spaces.

2.1. State Space

At each time step, the agent observes a state vector that represents the current condition of the system. This vector includes the following information:

- Queue lengths of each user
- Instantaneous channel gains of the users
- Remaining time to deadline for packets
- System time-related information

Through this structure, the agent is able to simultaneously evaluate traffic intensity, channel quality, and Quality of Service (QoS) requirements. This integrated state representation constitutes one of the main original contributions of the study.

2.2. Action Space

The action space represents the selection of the user to whom resources are allocated at each time step. For a system with N users, the action space is defined as:

$$A = \{1, 2, 3, \dots, N\}$$

This formulation is fully compatible with the discrete decision-making structure required by the DQN architecture.

2.3. Reward Function

The reward function is the most critical component that determines the direction of the policy learned by the agent. In this study, the reward function is designed to prioritize service requirements. Accordingly:

- A high negative reward is assigned in the event of a deadline violation
- Successfully transmitting packets that are close to their deadlines is encouraged through positive rewards
- Small positive rewards are given for reducing queue lengths
- Low penalties are imposed for inefficient or meaningless scheduling decisions

Through this reward structure, the agent learns a scheduling policy that minimizes deadline violations in the long term.

3. BENCHMARK ALGORITHMS

The performance of the proposed DRL-based scheduling approach is evaluated through comparison with two classical scheduling algorithms:

- Earliest Deadline First (EDF): A scheduling algorithm that prioritizes the packet with the closest deadline, without considering channel conditions or traffic intensity.
- Weighted Fair Queueing (WFQ): A weight-based scheduling approach that aims to ensure fair resource sharing among users.

These algorithms are executed within the same simulation environment, enabling a direct and fair performance comparison.

4. TRAINING PROCESS AND IMPLEMENTATION DETAILS

The DQN agent is trained through interaction with the simulation environment over a predefined number of time steps. At each time step, the agent selects an action, receives a reward from the environment, and updates its Q-values accordingly. After the training phase is completed, the learned

policy is saved as a model file, and performance evaluations are conducted during the testing phase using the fixed trained model.

The simulation outputs are analyzed in terms of deadline violations, average delay, throughput, and fairness metrics. These results are presented and discussed in detail in the following section.

RESULTS AND DISCUSSIONS

In this section, the performance of the deep reinforcement learning-based scheduler (DQN Scheduler) is comparatively evaluated against the classical Earliest Deadline First (EDF) and Weighted Fair Queueing (WFQ) algorithms. All methods are tested under the same simulation environment, identical traffic profiles, channel conditions, and service requirements to ensure a fair comparison. Performance evaluation is conducted based on four key metrics: deadline violation, average delay, throughput, and fairness.

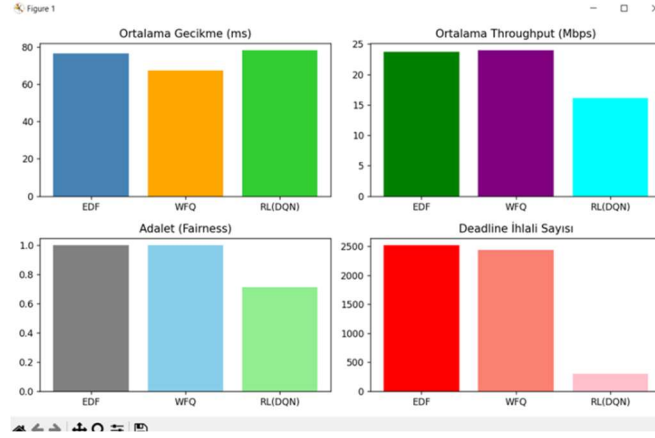


Figure 1. Average delay, throughput, fairness, and deadline violation results obtained by the EDF, WFQ, and DQN-based schedulers under identical traffic profiles and channel conditions.

1. DEADLINE VIOLATION PERFORMANCE

Deadline violation is the most critical metric that directly reflects scheduling performance for delay-sensitive applications. The experimental results indicate that the DQN-based scheduler achieves a significant improvement in terms of deadline violation compared to classical methods.

According to the simulation results, the DQN agent reduces deadline violations by approximately 80% compared to the EDF and WFQ algorithms in the considered scenario. The primary reason for this improvement lies in the design of the reward function, which explicitly penalizes deadline violations. Throughout the training process, the agent learns to make more informed resource allocation decisions by jointly considering packets approaching their deadlines and the corresponding channel conditions.

Although the EDF algorithm is theoretically effective in minimizing deadline violations, its inability to account for channel conditions often leads to the selection of users with poor channel quality, which in practice increases the number of violations. On the other hand, WFQ prioritizes fairness rather than deadline requirements, and therefore exhibits weak performance in delay-sensitive scenarios.

2. AVERAGE DELAY ANALYSIS

Average delay represents the total time packets spend in the system and directly affects overall user experience. The experimental results indicate that the DQN-based scheduler achieves performance

comparable to EDF in terms of average delay, while producing slightly higher delay than the WFQ algorithm.

The delay performance of the DQN agent is a natural outcome of its simultaneous consideration of traffic intensity, queue lengths, and channel gains. Rather than solely minimizing instantaneous delay, the agent learns a policy that prioritizes the reduction of deadline violations. As a result, in certain situations, packets approaching their deadlines are scheduled instead of users with more favorable channel conditions, leading to relatively higher average delay values compared to WFQ.

Although the EDF algorithm can yield lower average delay in specific scenarios, this performance is limited to favorable channel conditions due to its inability to account for channel state variations. In contrast, the DQN-based approach demonstrates more consistent and scenario-adaptive delay management across diverse traffic and channel conditions.

These findings indicate that the DRL-based scheduling approach does not aim to provide an absolute improvement in average delay, but rather effectively manages the trade-off between delay and deadline violation performance.

3. THROUGHPUT RESULTS

Throughput refers to the total amount of data that a system can transmit per unit time. In this scenario, it is observed that the WFQ algorithm achieves the highest throughput values, EDF exhibits moderate performance, and the DQN-based scheduler attains relatively lower throughput values.

This result should not be interpreted as a failure of the DQN agent. On the contrary, it reflects a deliberate design choice in the reward function. Since the agent prioritizes reducing deadline violations rather than maximizing throughput, it may occasionally choose to serve packets that are close to their deadlines even under poor channel conditions. This strategy leads to a decrease in throughput; however, it improves system reliability for delay-sensitive applications.

In the literature, this phenomenon is commonly described as a “performance trade-off”, which is frequently emphasized in QoS-prioritized scheduling approaches.

4. FAIRNESS EVALUATION

The fairness analysis was conducted using Jain’s Fairness Index. The results indicate that, as expected, the WFQ algorithm achieves the highest fairness values, EDF remains at a moderate level, and the DQN-based scheduler exhibits the lowest fairness performance.

The relatively low fairness value of the DQN agent is a methodologically expected and consistent outcome. The agent’s reward function is not designed to prioritize fairness; instead, it focuses on deadline satisfaction and delay sensitivity. As a result, some users are served more frequently, while users with unfavorable channel conditions or less suitable service requirements may receive fewer resources.

This behavior is a direct consequence of a deliberate design choice in the agent architecture. In scenarios where fairness is a primary objective, a multi-objective reinforcement learning approach can be developed by incorporating a fairness term into the reward function.

5. OVERALL EVALUATION AND DISCUSSION

The obtained results clearly demonstrate that the proposed DRL-based scheduling approach offers significant advantages over classical methods, particularly in scenarios with high deadline sensitivity. The integration of traffic intensity, channel conditions, and service requirements within a single learning-based model has enabled the agent to adapt effectively to dynamic environmental changes.

This study makes a noteworthy contribution by addressing scheduling components—often treated separately in the literature—from an integrated perspective. The findings indicate that AI-based scheduling approaches provide practically applicable and effective solutions for modern communication and computing systems.

REFERENCES

- [1] K. Ashok, P. S. Darius, and S. G. S. Babu, "Deep Reinforcement Learning (DRL) for resource allocation in Cloud: Review and Prospects," in 2024 5th International Conference on Communication, Computing & Industry 6.0 (C2I6), 2024: IEEE, pp. 1-6.
- [2] Y. Cao, R. Wang, M. Chen, and A. Barnawi, "AI agent in software-defined network: Agent-based network service prediction and wireless resource scheduling optimization," *Ieee Internet Things*, vol. 7, no. 7, pp. 5816-5826, 2019.
- [3] S. Feng, J. W. Zhang, J. Dai, Y. S. Liu, Z. H. Liu, and Y. F. Ji, "Seamless data delivery for distributed AI workloads via dynamic queue scheduling and FPGA-based implementation in converged optical-electrical networks," (in English), *J Opt Commun Netw*, vol. 17, no. 9, pp. 820-833, Sep 2025, doi: 10.1364/Jocn.563049.
- [4] D. Giagkos, A. Tzenetopoulos, D. Masouros, S. Xydis, F. Catthoor, and D. Soudris, "AI-Driven QoS-Aware Scheduling for Serverless Video Analytics at the Edge," (in English), *Information*, vol. 15, no. 8, Aug 2024, doi: ARTN 48010.3390/info15080480.
- [5] H. Hosseini and E. Aryafar, "AI-Based Interference Pattern Prediction and Fair Scheduling in Full-Duplex Wireless IoT Networks," (in English), 2025 *Ieee World Ai Iot Congress, Aiiot*, pp. 503-512, 2025, doi: 10.1109/AIIoT65859.2025.11105370.
- [6] N. Hudson, H. Khamfroush, M. Baughman, D. E. Lucani, K. Chard, and I. Foster, "QoS-aware edge AI placement and scheduling with multiple implementations in FaaS-based edge computing," (in English), *Future Gener Comp Sy*, vol. 157, pp. 250-263, Aug 2024, doi: 10.1016/j.future.2024.03.035.
- [7] A. M. A. Ibrahim et al., "Advancing 6G-IoT networks: Willow catkin packet transmission scheduling with AI and bayesian game-theoretic approach-based resource allocation," (in English), *Internet Things-Neth*, vol. 25, Apr 2024, doi: ARTN 10111910.1016/j.iot.2024.101119.
- [8] S. T. Islam, "WIP: AI-based Dynamic Joint Schedule Calculation for TSN over 5G using GCN-TD3," (in English), *Ieee Int C Emerg*, 2024, doi: 10.1109/Etfa61755.2024.10710660.
- [9] S. T. Islam and A. Bin Muslim, "AI-based Dynamic Schedule Calculation in Time Sensitive Networks using GCN-TD3," (in English), *IFIP Networking Conf*, pp. 714-719, 2024, doi: 10.23919/IFIPNetworking62109.2024.10619807.
- [10] D. B. Lopez, D. S. Pazmino, and I. N. Pena, "AI-Powered High-Performance Computing for Real-Time Data Processing in 6G Networks," in 2025 World Skills Conference on Universal Data Analytics and Sciences (WorldSUAS), 2025: IEEE, pp. 1-6.
- [11] C. Lua, D. Onwuchekwa, and R. Obermaier, "AI-Based Scheduling for Adaptive Time-Triggered Networks," (in English), *Medd C Embed Comput*, pp. 15-21, 2022, doi: 10.1109/Meco55406.2022.9797075.
- [12] A. Mamane, M. Fattah, M. El Ghazi, M. El Bekkali, Y. Balboul, and S. Mazer, "Scheduling algorithms for 5G networks and beyond: Classification and survey," *IEEe Access*, vol. 10, pp. 51643-51661, 2022.
- [13] B. Mumey, J. Tang, I. Judson, and R. S. Wolff, "Beam Scheduling and Relay Assignment in Wireless Relay Networks with Smart Antennas," (in English), *Ieee Infocom Ser*, pp. 130-134, 2013. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:000326335200034.
- [14] M. Schartner, C. Plötz, and B. Soja, "Automated VLBI scheduling using AI-based parameter optimization," (in English), *J Geodesy*, vol. 95, no. 5, May 2021, doi: ARTN 5810.1007/s00190-021-01512-w.
- [15] P. Tamilarasu and G. Singaravel, "Quality of service aware improved coati optimization algorithm for efficient task scheduling in cloud computing environment," (in English), *J Eng Res-Kuwait*, vol. 12, no. 4, pp. 768-780, Dec 2024, doi: 10.1016/j.jer.2023.09.024.
- [16] A. N. Temurçin and M. Ersoy, "AĞ ALTYAPILARINDA YAPAY ZEKA TABANLI AĞ TRAFİK YÖNETİM MEKANİZMALARININ İNCELENMESİ," *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, vol. 7, no. 1, pp. 31-40, 2023.
- [17] A. Vatankehah and R. Liscano, "Quality of Service-Aware Multi-Objective Enhanced Differential Evolution Optimization for Time Slotted Channel Hopping Scheduling in Heterogeneous Internet of Things Sensor Networks," (in English), *Sensors-Basel*, vol. 24, no. 18, Sep 2024, doi: ARTN 598710.3390/s24185987.

- [18] Y. Villeneuve, S. Séguin, and A. Chehri, "AI-Based Scheduling Models, Optimization, and Prediction for Hydropower Generation: Opportunities, Issues, and Future Directions," (in English), *Energies*, vol. 16, no. 8, Apr 2023, doi: ARTN 333510.3390/en16083335.
- [19] R. K. Wang et al., "Network for AI: Communication-Efficient Federated Learning with MST-based Scheduling and Multi-Aggregation over Optical Networks," (in English), 2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Ofc, 2024. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:001242671400690.
- [20] Y. Wang, "Computational Network Energy Efficiency Evaluation, Low-Carbon Scheduling, and Intelligent Optimization System," in 2025 5th International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Technology Applications (AIITA), 2025: IEEE, pp. 319-324.
- [21] A. Yu, J. Kang, and D. Lin, "AI-Enabled Efficient Traffic Scheduling for Autonomous Vehicles," (in English), *Consum Comm Network*, 2025, doi: 10.1109/Ccnc54725.2025.10976106.
- [22] W. Zhang et al., "GenNet: Computing-Efficient Generative AI for Deterministic Transmission Scheduling in 6G Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 63, no. 8, pp. 48-55, 2025.
- [23] C. Zhao, L. Wang, Q. Zhang, and R. Song, "Resource Scheduling and Optimization Strategy in Edge Computing Environment," in 2024 International Conference on Industrial IoT, Big Data and Supply Chain (IIoTBDSC), 2024: IEEE, pp. 391-395.
- [24] J. Zou, P. Z. Xin, C. Wang, H. L. Zhang, L. Wei, and Y. Wang, "AI Services-Oriented Dynamic Computing Resource Scheduling Algorithm Based on Distributed Data Parallelism in Edge Computing Network of Smart Grid," (in English), *Future Internet*, vol. 16, no. 9, Sep 2024, doi: ARTN 31210.3390/fi16090312.

TERMAL GÖRÜNTÜLEME VERİLERİ İÇİN UÇ CİHAZLARDA DERİN ÖĞRENME TABANLI NESNE TESPİTİ

Belkıs ERGÜVEN^{1*}, Züleyha YILMAZ ACAR²

Özet – Bu makalede termal görüntülerden ve uç cihazlardan bahsedilerek termal görüntüler için uç cihazlarda kullanılan derin öğrenme tabanlı uygulamalar incelenmiştir. Öncelikle termal kameralar ve yaygın olarak kullanılan termal veri setleri tanıtılmış ardından uç cihazların yapısı, sınırlamaları ve uç cihazlarda optimizasyon için kullanılan ağ budama ve kuantizasyon yöntemleri açıklanmıştır. Daha sonra uç sistemlerde kullanılan makine öğrenmesi yazılım araçları ve kullanılan donanımlar incelenmiştir. Uç cihazların avantajlarından ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Ayrıca derin öğrenmeden kısaca bahsedilerek derin öğrenme tabanlı nesne tespit algoritmalarından YOLO ve SSD gibi popüler modeller kısaca açıklanmıştır. Son olarak uç cihazlarda derin öğrenme tabanlı nesne tespiti üzerine yapılan çalışmaların literatür taraması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Termal Kameralar, Uç cihazlar, Derin Öğrenme, Nesne Tespit

GİRİŞ

Bulut sistemlerinde kullanılan büyük veriler ağ bant üzerinde yük oluşturarak hesaplama maliyetinde artışa neden olmuştur. Bu durum uç sistemlerin gelişmesine zemin hazırlamıştır. Uç cihazlar hesaplamalarını veri kaynağına yakın bir şekilde ağıncı ucunda yapılmasına olanak sağlamıştır. Uç sistemlerin sınırlı bir bellek kapasitesine sahip olması uç cihazlarda yaşanan zorluklar arasındadır. Yüksek hesaplama gücü gerektiren derin öğrenme algoritmaları uç cihazlarda doğrudan çalıştırmak zordur. Derin öğrenme modellerini uç cihazlarda işleyebilmek için kuantizasyon ve ağ budama gibi optimizasyon yöntemlerinin kullanılması gerekir. Optimizasyon yöntemleri ile hesaplama maliyeti düşürülerek gerçek zamanlı performans sağlanmış olur. Derin öğrenme modellerin uç cihazlarda kullanılabilmesi için çeşitli yazılım araçları ve donanımlar geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemler ve optimizasyon yöntemleri makine öğrenmesi modellerinin uç cihazlarda kullanılmasına olanak sağlamıştır. Uç cihazlarda yapay zekâ teknolojileri akıllı ev, akıllı telefon, insansız hava araçları, otonom araçlar, hastalık teşhisi, akıllı izleme gibi birçok alanlarda kullanılmaktadır. Bu makalede termal kameralardan ve uç cihazlardan bahsedilerek uç cihazlarda kullanılan optimizasyon yöntemleri incelenmiştir. Derin öğrenme modellerin uç cihazlarda kullanılması için gereken yazılım sistemleri ve donanımlar açıklanarak tablo şeklinde gösterilmiştir. Daha sonra kısaca derin öğrenmeden bahsedilerek nesne tespit için kullanılan derin öğrenme modelleri hakkında bilgi verilmiştir. Son olarak termal kameralar için uç cihazlarda kullanılan derin öğrenme modelleri ile nesne tespit hakkında literatür taraması yapılmıştır.

MATERIALS AND METHOD

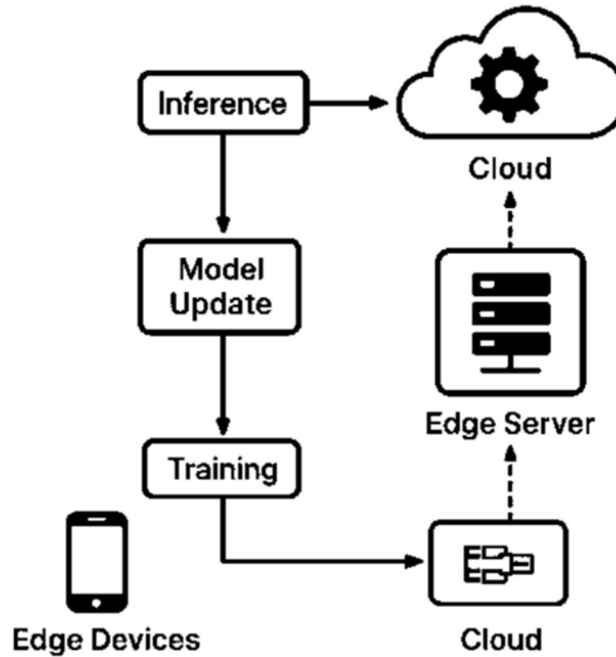
Termal Kameralar

Termal kameralar insan gözünün algılayamayacağı cisimleri termal yayılım radyasyonu kullanarak sıcaklıktaki enerji yayılımlarına göre görüntüleme işlemi gerçekleştirmektedir. Cisimlerin yaydığı ısı miktarına göre renk haritası oluşturularak açık renkler sıcak bölgeleri, koyu renkler soğuk bölgeleri göstermektedir[1]. Sıcaklık değeri -273°C üzerinde olan cisimler termal enerji yaymaktadır. Bu enerji kızıl ötesi aralıkta yayılarak nesnenin sıcaklığını kızıl ötesi enerjiye göre renklendirir[2]. Termal kameralar kızıl ötesi ışınımaları algılayarak sıcaklık durumlarını analiz eder. Termal alıcılar sayesinde cisimlerin enerjisinden ortaya çıkan kızılötesi ışınları kaydederek dijital kameraların tespit edemediği cisimleri belirleyerek sıcaklık dağılımını gösteren bir resim oluşturur[3]. Termal kameralar düşük çözünürlük, çok yüksek parlaklık seviyesi ve gürültülerden etkilenebilmektedir. Bu durumlarda termal görüntüleri iyileştirilmek için gradient, morfolojik işlemler ve Fourier dönüşümüne dayanan bir

iyileştirme teknikleri kullanılabilir. Görüntü işleme tekniklerinde ise görüntü iyileştirme, görüntü sıkıştırma, morfolojik işlemler, bölütleme gibi yöntemler ile termal görüntüler üzerinde iyileştirmeler yapılabilir[4]. Termal görüntüleme CVC-09 FIR, KAIST Multispectral, OSU Color-Thermal, Tokyo Multispectral, OTCBVS veri setleri kullanılmaktadır. Termal kameralar ışığın az olduğu ortamlarda ve olumsuz hava şartlarında dahi nesneleri tespit etmede çalışabilmektedir. Termal kameralar görüş teknolojileri, yangın sistemleri, insansız hava araçları, yeraltı kaynakların bulunması, elektrik sistemlerde arıza belirleme, hastalık teşhisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır

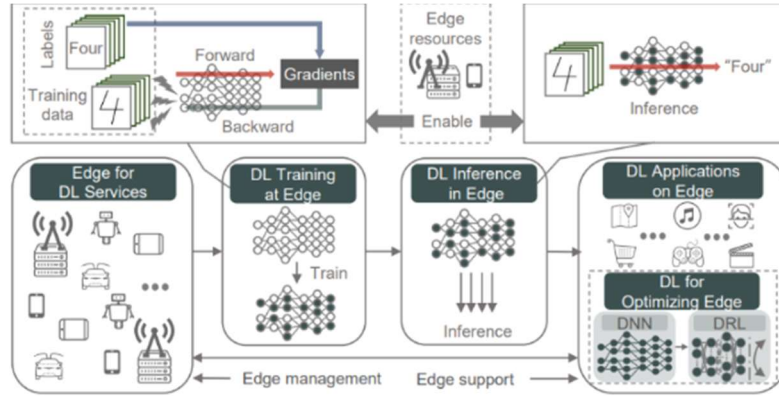
Uç Cihazlar

Nesneler birbirleri ile iletişim kurarak cihazlar üzerinden veri alışverişi yapabilmektedir. Nesnelerin interneti(IoT) kavramı ile büyük miktarda veriler ortaya çıkmıştır. Bu veriler işlenmek üzere uzak bulut bilişim merkezine gönderilir ve çıkarımlar tekrar cihaza iletilir. Ancak görüntü ve video gibi büyük verilerin uzak buluta aktarılması, iletim süresini uzattığı için gecikmeyi de artırır ve ek enerji tüketimine yol açar. Bu gecikme ve enerji sorunlarını azaltmak için uç bilişim yaklaşımı devreye girer[5]. Uç cihazlar yapay zekâ uygulamalarını bulut yerine verinin bulunduğu noktada çalıştırmak için tasarlanmış sınırlı bellek ile donatılan gömülü işlemcileridir[6]. Yapay zekâ modeli ile mobil cihazda kullanılan uç sistemlerin şeması aşağıda görselleştirilmiştir. Burada çıkarım ve eğitim işlemlerin uç servislere aktarımı gösterilmiştir[7].



Şekil 1: Yapay Zekâ Modellerin Uç Cihazlarda Çalışması

Verileri bulut bilişim alanına yüklemekten hesaplamalarını ağın ucunda yaparak hem kullanıcıya hem de veri kaynağına daha yakın olmaktadır. Böylece iletim maliyetini ve enerji tüketimini azaltarak veri güvenliği sağlanmış olur[8]. Uç ile bulut arasındaki veri aktarımı sırasında oluşan gecikmeler yapay zekâ hesaplamaların uçta yapılmasını gerekli kılar. Özellikle otonom araçlarda nesne tanıma ve video analizi gibi işlemlerde bu gecikmeler önemli sorunlara yol açabilir. Uç bilişim gecikmeyi minimuma indirerek anlık karar alınmasını sağlar[9]. Derin öğrenme modellerinden yararlanan akıllı telefon, akıllı araç, IoT, robotlar gibi uç cihazlar için eğitim ve çıkarım işlemleri aşağıdaki görselde verilmiştir[10].



Şekil 2: Uç cihazlarda Derin Öğrenme

Derin öğrenme modellerin karmaşık yapısı ve yüksek hesaplama gücüne sahip olması nedeniyle çoğunluğu bulut üzerinde çalışmaktadır. Ancak akıllı üretim gibi gerçek zamanlı hizmetlerde sadece bulut sisteminin kullanılması gecikme sorunlarını ortaya çıkarır. Bu durumda derin öğrenme modellerin uçta uygulanmasının gerekliliğini göstermektedir. Akıllı televizyonlar, akıllı klimalar gibi akıllı ev uygulamalarında uç cihazlar kullanılmaktadır[10]. Uç cihazlara entegre edilebilen derin öğrenme yöntemi için derin öğrenme modellerini destekleyebilecek sistemler geliştirilmiştir. Uçta makine öğrenimi için hesaplama cihazları, yazılım geliştirme araçları ve çeşitli uygulamalar oluşturulmuştur. Bulut sistemi için tasarlanan yazılım geliştirme araçlarından TensorFlow, Caffe, PyTorch gibi uç cihazlarda doğrudan kullanılmamaktadır. Uçta verinin işlenebilmesi için TensorFlow Lite, Caffe2, PyTorch, MXNet, CoreML, TensorRT, ONNX Runtime gibi uç cihazlarda derin öğrenme modelleri için çeşitli yazılım geliştirme araçları tasarlanmıştır. Bu araçlar modellerin uç cihazlarda verimli çalışması için geliştirilmiştir. Aşağıdaki tabloda yazılım geliştirme araçları, araçların üreticileri, görevleri ve hangi cihazlarda kullanıldıkları verilmiştir[11].

Tablo 1: Uç cihazlarda Derin Öğrenme Modelleri İçin Yazılım Geliştirme Araçları

Features	TensorFlow Lite	Caffe2	PyTorch	MXNet	CoreML	TensorRT
Developer	Google	Google	Face book	DMLC,Amazon	Apple	NVIDIA
Open Source license	Apache 2.0	Apache 2.0	BSD	Apache 2.0	Not Open Source	Not Open Source
Task	Inference	Training/Inference	Training/Inference	Training/Inference	Inference	Inference
Target Device	Mobile and embedded device	Multiple platform	Multiple platform	Multiple platform	Apple Device	NVIDIA GPU
Characteristic	Latency	Lightweight/modular	Research	Large scale deep neural networks	Memory footprint and power consumption	Latency and throughput

Ayrıca OpenEI, AWS IoT Greengrass ve Google Cloud IoT Edge gibi sistemler, uç cihazların veri paylaşımı ve tahmin yapabilmesini sağlar[11]. Uç cihazlarda derin öğrenme modellerinde dağıtılması için ASIC'ler, FPGA'lar, RISC-V tabanlı donanım sistemleri ve gömülü GPU'lar tasarlanmıştır. Gömülü GPU'larda geliştirilen sistemlere Raspberry Pi, Nvidia Jetson, OpenMV Cam örnek olarak verilebilir. OpenMV düşük enerji tüketen bir kamera kartıdır. Yüz tanıma, göz takibi gibi makine görüşü uygulamalarında kullanılmaktadır. Raspberry Pi ise GPU ve TPU gibi ek donanım gerektirmeden makine öğrenmesi çıkarımı yapabilmektedir. Nvidia Jetson karmaşık verileri gerçek zamanlı işleyebilen gömülü bir karttır. Görüntü işleme uygulamalarında Google Coral Dev Board , konuşma tanıma uygulamalarında SparkFun Edge, bilgisayarlı görüde Intel Movidius NCS ve BeagleBone AI gibi ASIC tabanlı donanımlar kullanılmaktadır[12].

Aşağıdaki Tablo 2 uç cihazlarda kullanılan donanımların makine öğrenmesi kullanım alanları verilmiştir[13]

Tablo 2: Uç cihazlarda kullanılan donanımların makine öğrenmesi kullanım alanları

Cihaz	Güç	ML Kullanımı	Uygulama Alanı
Jetson Nano	Güçlü	İnference	Video, Görüntü Tanıma
JetsonTX1	Güçlü	İnference	Video, Görüntü Analizi
Jetson TX2	Güçlü	İnference	Video, Görüntü Analizi
Samsung Galaxy S8 (Exynos 8895 SoC)	Güçlü	İnference	Görüntü Tanıma
Odroid-XU4 (Exynos 5422 SoC)	Güçlü	İnference	Otomobil Trafiği, Kentsel Taşkın
Huawei P40 PRO (Kirin 990)	Güçlü	İnference	Video Süper Çözünürlük
Raspberry Pi 3	Düşük	İnference	Video Analizi
Raspberry Pi Z2 W	Düşük	İnference	Nesne Tespit
Raspberry Pi 4	Düşük	İnference	Görüntü Analiz
Motorola Z2 Force (Snapdragon 835 SoC)	Düşük	İnference	Görüntü Sınıflandırma
STM32F765VI	Düşük	İnference	Görüntü Tanıma
STM32F103	Düşük	İnference	Görüntü Tanıma

Optimizasyon Yöntemleri

Artan veri ile birlikte oluşan yüksek bant genişliği, derin sinir ağlarının (DNN) yüksek hesaplama gücüne sahip olması ve karar verme sürecini etkileyen düşük gecikme gibi gereksinimlerden dolayı DNN'lerin hesaplama süresini ve bellek kullanımını azaltmayı amaçlayan optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir[14]. Sınırlı kaynaklara sahip olan uç cihazlar, derin öğrenme modellerinin çalıştırılması sırasında hesaplama maliyetleri ve model karmaşıklığı nedeniyle zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu sorunları gidermek için veri azaltma ve kuantizasyon gibi sıkıştırma teknikleri kullanılmaktadır. Böylece donanım yükü hafifletilerek maliyette azalma olur ve gerçek zamanlı performans sağlanır[15]. Veri azaltma işlemlerinde budama(pruning), sıfır atlatma(zero-skipping) yöntemleri kullanılır. Ağ budama uç cihazlarda yapay zekâ uygulamaları için derin sinir ağlarındaki gereksiz parametreleri ve katmanları kaldırarak hesaplama maliyetini azaltır ve düşük bellek tüketimi sağlar[10]. Optimizasyon tabanlı budama yöntemlerinde alt kanallardaki filtreler seçilerek çıkış özelliği haritası korunmaktadır. ThiNet yöntemi ile çıkışa en az katkı sağlayan kanallar bulunur ve buna karşılık gelen filtreler budanarak kalan filtre ağırlıkları en küçük kareler yöntemi ile güncellenmektedir. AOFB ikili arama yaklaşımı olan top-down yöntemini kullanır. Sabit budama oranı belirlemeden etkisi en büyük filtreler korunarak filtrelerin çıkarılma durumunu ölçer[16]. Ağırlık sayısını önemli ölçüde azaltan ağ budama yönteminin dezavantajlarından biri ağırlık matrisinde seyrilmeye sebep olarak donanım verimliliğini düşürebilir. Gömülü sistemler ve kısıtlı kaynağa sahip cihazlar, derin öğrenme modelini kullanmak için model parametrelerinde bulunan sayısal değerlerin hassasiyetini düşürerek hesaplama maliyetini azaltmayı amaçlayan kuantizasyon yöntemini kullanırlar[17]. Kuantizasyon yüksek maliyetli floating-point

işlemlerine duyulan ihtiyacı azaltmak için modelde kullanılan ağırlık ve bit genişliğini düşürür böylece bellek kullanımını azaltır ve enerji verimliliğini artırır[18]. Kuantizasyon aşamasında kullanılan model post-training yöntemiyle eğitilmeden önce quantixation ve quantization-aware training kısımları belirlenir. Eğitildikten sonra kuantizasyon uygulayarak doğruluk kontrol edilerek gerekirse model yeniden eğitilir[19].

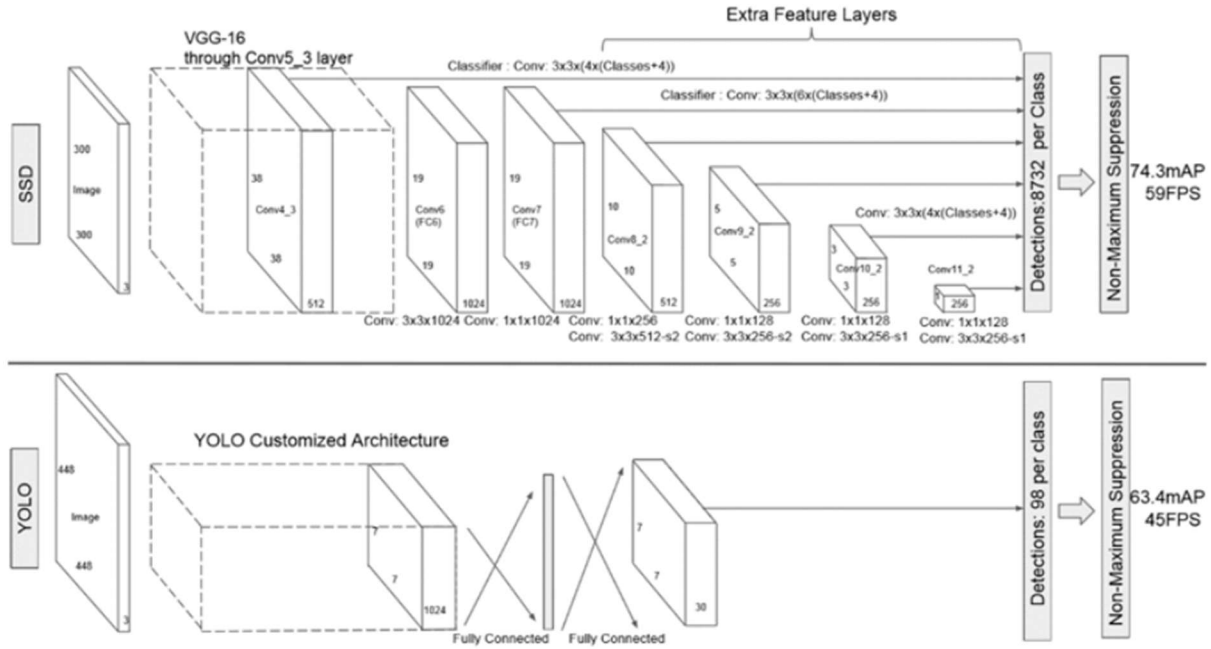
Uç cihazlar veriyi kaynağında yakın işleyerek gerçek zamanlı uygulamaların çalışmasını sağlar. Bu durum hızlı yanıt gerektiren işlemlerde önem arz etmektedir. Uç sistemler verileri sürekli olarak buluta aktarmadığı için ağ tıkanıklığını azaltarak bant genişliğini düşürür. Bazı bulut hizmetleri depolama alanlarına göre ücretlendirilir. Uç sistemler verinin uygun olan kısmını uça depolayarak işler ve bunun sonucunda maliyette azalma meydana gelir. İşlem gücünün ve depolama alanın kısıtlı olması yaşanan en önemli dezavantajdır. Bu durumda karmaşık ve yüksek hesaplama gücüne sahip derin öğrenme modellerin uç cihazlarda çalıştırılmasını zorlaştırır. Bu nedenle model optimizasyonu ya da hafif modellerin kullanılması gerekmektedir. Hafif modeller ve model optimizasyonu doğruluk performansında azalmaya yol açabilir. Uç cihazlarda yazılım ve donanım araçlarının birbirleri ile uyumlu bir şekilde çalışması gerekmektedir. FBGA Gibi düşük güç tüketimine sahip donanımlar programlama ve optimizasyon işlemlerinde zorluklar yaşayabilmektedir[20].

Derin Öğrenme

Derin öğrenme yapay sinir ağları adı verilen ve beynin yapısından ilham alan algoritmalarla ilgilenen makine öğrenmesinin bir alt dalıdır. Bu yapay sinir ağları ile verileri öğrenmeyi amaçlayarak giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanından oluşmaktadır. İnsan müdahalesi olmadan sinir ağlarını kullanarak verilerden özellik çıkaran bir modeldir. Geleneksel makine öğrenme yönteminde kullanılan önceden tanımlanmış kuralları kullanmadan resim, metin ses, video gibi verilerden özellikleri kendisi çıkarabilmektedir[21]. Nesne tespit işlemleri genelde tek aşamalı ve iki aşamalı şeklinde yapılmaktadır. İki aşamalı tespitte konumlandırma ve sınıflandırmada doğruluk değerleri yüksektir. Tek aşamalı nesne tespiti aday bölge oluşturma işlemi yapmadan giriş görüntüsünün sınıfını bulmaya çalışarak gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılır[22]. YOLO ve SSD tek aşamalı tespiti, R-CNN, Faster R-CNN ise iki aşamalı tespiti örnek verilebilir. Derin öğrenme algoritmaları kullanılarak nesne tespit işlemleri farklı alanlarda yapılabilmektedir. İnsansız hava araçları, otonom araçlar, termal kameralar, yüz algılama, robotik sistemler, gömülü sistemler gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Derin öğrenimde nesne tespit işlemlerinde en çok R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, SSD, YOLO gibi algoritmalar kullanılmaktadır. Bu çalışmada Single Shot Multi Box Detector(SSD) ve You Only Look Once(YOLO) algoritmaları incelenmiştir.

SSD: YOLO dan farklı olarak CNN mimarisine farklı özellikler ekleyerek bulunduğu ızgara yapısına göre nesnenin farkı böğlerinden en büyük güven oranı seçilerek nesne yerlerini bulmaktadır[23]. Öncelikle özellik haritası çıkarma işlemini ardından evrişim filtresi kullanarak düşük çözünürlüklü görüntülerde bile nesne tespiti yapılabilmektedir[24].

YOLO: Görüntüyü bölüm bölüm taramak yerine tüm görüntüyü ızgaralara böler ızgaraların her biri belirlenmiş sınır kutusu ve tek bir nesneyi tahmin etmeye çalışır[25]. Tek aşamalı tespit algoritması olan YOLO güven skorunun sınıf olasılıklarını hesaplayarak tahmin değerine ulaşır. Görüntülerden özellik çıkarımı yaptığı kısım backbone, çıkarılan özellikleri ölçekleyip zenginleştirdiği kısım neck, sınıf olasılıkların tahmini yapıldığı kısım ise head olarak adlandırılır[26]. Aşağıda SSD ve YOLO mimarileri birlikte verilmiştir[23].



Şekil 3. SSD ve YOLO Modelleri

LİTERATÜR TARAMASI

Yapılan çalışmada termal görüntüler kullanarak uç cihazda gerçek zamanlı yaprak hastalığı sınıflandırma işlemi derin öğrenme modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Raspberry Pi 4B gömülü uç cihazı MobileNet, MobileNetV2, InceptionV3 ve VGG16 derin öğrenme modelleri ile test edilmiştir. **MobileNetV1** ve InceptionV3 en iyi performans sağladığı gözlemlenmiştir[27].

İnsan, araba, direk, motosiklet, otobüs, bisiklet gibi nesneleri algılamayı amaçlayan Termal tiny YOLO çok sınıflı nesne tespit modeli önerilmiştir. Bu model uç cihazlara çalışabilen TensorFlow Lite kuantizasyon aracı kullanarak ARM işlemci tabanlı Raspberry Pi 4 kartı üzerinde test edilmiştir. Ortalama doğruluk oranı %56,4 olarak hesaplanmıştır[28].

Uç cihazlarda çalışabilen Konvolüsyon blokları ve YOLO tabanlı nesne tespit modeli önerilmiştir. Bloklar maksimum kernel sayılarına göre tasarlanmıştır. YOLO mimarilerinden SF-YOLO modeli YOLOv3 tinye göre 2 kat daha hızlı çalışmıştır. Doğrulukları ise eşit olarak hesaplanmıştır[29]

SONUÇ

Bulut sisteminde çok fazla veri işlenmesi veri trafiğine neden olmuştur. Bu durumda veriyi kaynağa yakın noktada işleyip buluta gönderen uç cihazları ortaya çıkarmıştır. Uç cihazlar verileri bulut bilişim alanına yüklemeyen hesaplamalarını ağıncuunda yaparak kullanıcıya ve veri kaynağına daha yakın olmaktadır. Uç cihazlar tüm verileri buluta göndermek yerine anlamlı verileri buluta göndererek ağ bant genişliği üzerindeki yükü azaltır. Böylece iletim maliyetini, enerji tüketimini, gecikme süresini azaltarak veri güvenliği sağlanmış olur. Derin sinir ağları günümüzde birçok yapay zekâ teknolojilerinde kullanılmaktadır. Derin sinir ağlarının yüksek hesaplama maliyetinden dolayı eğitim süresi ve enerji tüketimi artabilmektedir. Uç ve bulut arasında veri iletimi sırasında oluşan gecikmeler yapay zekâ sistemlerin bulut yerine uçta yapılmasını gerekli kılmıştır. Yapay zekâ sistemleri direk olarak uç cihazlarda kullanılmadığı için optimizasyon işlemlerinden geçirilmelidir. Optimizasyon işlemleri ile verideki hesaplama maliyeti azaltılmak amaçlanmıştır. Uç cihazlarda entegre edilebilen derin öğrenme yöntemi için derin öğrenme modellerini destekleyebilecek çeşitli yazılım araçları, donanım hızlandırıcılar ve optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Böylece hesaplama maliyeti düşürülerek gerçek zamanlı yapay zekâ uygulamaların çalışması hedeflenmiştir. Uç cihazlarda işlem gücünün ve depolama alanının kısıtlı olması yaşanan dezavantajlardan biridir. Bu durum karmaşık ve yüksek hesaplama gücüne sahip derin öğrenme modellerin uç cihazlarda çalıştırılmasını zorlaştırmaktadır. Buna çözüm olarak çeşitli

optimizasyon yöntemleri kullanılabilirse de modelin doğruluk değerinde düşüşler meydana gelebilmektedir. Bu dezavantaj için doğruluk değer kaybını en az etkileyecek çözüm yöntemleri bulunmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] A. Çaylı *et al.*, “Seralarda ısı kaybına neden olan yapısal sorunların termal kamera ile belirlenmesi,” *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*, vol. 19, no. 1, pp. 5–14, 2016.
- [2] A. İlçe and B. Demir, “Kızılötesi termal kameranın sağlık alanlarında kullanımı,” *Sağlık Bakım ve Rehabilitasyon Dergisi*, vol. 3, no. 1, pp. 12–25, 2024.
- [3] A. Durgut and Ö. Akçay, “Termal kamera ile ekran kartının 3 boyutlu modelinin oluşturulması,” *Anadolu University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 51–63, 2016.
- [4] M. Çalışan and İ. Türkoğlu, *Improvement of thermal camera images (Termal kamera görüntülerinin iyileştirilmesi)*.
- [5] E. Li, Z. Zhou, and X. Chen, “Edge intelligence: On-demand deep learning model co-inference with device-edge synergy,” in *Proc. 2018 Workshop on Mobile Edge Communications*, 2018.
- [6] P. Kang and A. Somtham, “An evaluation of modern accelerator-based edge devices for object detection applications,” *Mathematics*, vol. 10, no. 22, art. no. 4299, 2022.
- [7] V. S. R. Narapareddy and S. K. Y., “Edge AI and on-device machine learning,” *American Academic Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 2025.
- [8] K. Cao *et al.*, “An overview on edge computing research,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 85714–85728, 2020.
- [9] M. Burhanuddin, “Efficient hardware acceleration techniques for deep learning on edge devices: A comprehensive performance analysis,” *Khwarizmia*, vol. 2023, pp. 103–112, 2023.
- [10] X. Wang *et al.*, “Empowering edge intelligence: A comprehensive survey on on-device AI models,” *ACM Computing Surveys*, vol. 57, no. 9, pp. 1–39, 2025.
- [11] F. Liu *et al.*, “A survey on edge computing systems and tools,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 8, pp. 1537–1562, 2019.
- [12] M. S. Murshed *et al.*, “Machine learning at the network edge: A survey,” *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 54, no. 8, pp. 1–37, 2021.
- [13] L. Martin Wisniewski *et al.*, “Hardware solutions for low-power smart edge computing,” *Journal of Low Power Electronics and Applications*, vol. 12, no. 4, art. no. 61, 2022.
- [14] M. P. Véstias *et al.*, “Moving deep learning to the edge,” *Algorithms*, vol. 13, no. 5, art. no. 125, 2020.
- [15] R. Zhang *et al.*, “Optimization methods, challenges, and opportunities for edge inference: A comprehensive survey,” *Electronics*, vol. 14, no. 7, art. no. 1345, 2025.
- [16] S. Vadera and S. Ameen, “Methods for pruning deep neural networks,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 63280–63300, 2022.
- [17] A. R. Khouas *et al.*, “Training machine learning models at the edge: A survey,” *arXiv preprint arXiv:2403.02619*, 2024.
- [18] D. Ngo, H.-C. Park, and B. Kang, “Edge intelligence: A review of deep neural network inference in resource-limited environments,” *Electronics*, vol. 14, no. 12, art. no. 2495, 2025.
- [19] C. Surianarayanan *et al.*, “A survey on optimization techniques for edge artificial intelligence (AI),” *Sensors*, vol. 23, no. 3, art. no. 1279, 2023.
- [20] Y. Xu *et al.*, “Edge deep learning in computer vision and medical diagnostics: A comprehensive survey,” *Artificial Intelligence Review*, vol. 58, no. 3, art. no. 93, 2025.
- [21] U. Kaya, A. Yılmaz, and Y. Dikmen, “Sağlık alanında kullanılan derin öğrenme yöntemleri,” *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 16, pp. 792–808, 2019.
- [22] L. Jiao *et al.*, “A survey of deep learning-based object detection,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 128837–128868, 2019.
- [23] B. İpek, *Derin öğrenme temelli nesne tespit algoritmalarının insansız hava araçlarında uygulanması*, Lisans tezi, Bilgisayar Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi, 2018–2019.
- [24] F. G. Tan *et al.*, “Derin öğrenme teknikleri ile nesne tespiti ve takibi üzerine bir inceleme,” *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 25, pp. 159–171, 2021.
- [25] B. Yıldırım and G. Cagıl, “Bir montaj parçasının derin öğrenme ve görüntü işleme ile tespiti,” *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, vol. 3, no. 2, pp. 31–37, 2020.
- [26] C. M. Badgujar, A. Poullose, and H. Gan, “Agricultural object detection with You Only Look Once (YOLO) algorithm: A bibliometric and systematic literature review,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.

- 223, art. no. 109090, 2024.
- [27] P. E. C. da Silva and J. Almeida, "An edge computing-based solution for real-time leaf disease classification using thermal imaging," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024.
- [28] M. A. Farooq *et al.*, "Development, optimization, and deployment of thermal forward vision systems for advanced vehicular applications on edge devices," in *Proc. Fifteenth Int. Conf. on Machine Vision (ICMV 2022)*, SPIE, 2023.
- [29] B.-G. Han *et al.*, "Design of a scalable and fast YOLO for edge-computing devices," *Sensors*, vol. 20, no. 23, art. no. 6779, 2020.

TARGET DETECTION FROM IMAGES

Belkıs ERGÜVEN¹, Züleyha YILMAZ ACAR^{2*}

Abstract – Object detection from images constitutes one of the fields of computer vision. As a result of the combination of computer vision and deep learning models, significant progress has been made in object detection processes. Deep learning is a machine learning algorithm consisting of many layers that predicts results with a given dataset. Today, it is used with different models in the field of object detection. The recognition of images has been enabled by the use of deep learning algorithms. It appears with high accuracy rates in object detection operations. It is observed that it comes to the forefront with the use of object detection in thermal cameras, unmanned aerial vehicles (UAVs), military vehicles, and autonomous vehicles. In this paper, studies related to target detection and recognition applications where object detection and deep learning methods are used together in the literature have been examined. Algorithms frequently used in object detection have been compared.

Keywords – Object Detection, Deep Learning, Computer Vision

INTRODUCTION

Image processing performs a number of operations using computational algorithms on images to increase the visual quality of the image and to extract important information. The object recognition process manages the process of automatically distinguishing and defining objects in processed images. The aim here is to accurately predict the objects in the image. Artificial intelligence and machine learning are methods used in object detection. The detection of objects from the processed image is done more accurately. These methods allow for the detection and classification of objects by learning distinctive visual features such as edges, shapes, and color distributions from pixel matrices in images. While operations such as feature extraction are performed with manual algorithms in traditional image processing techniques, deep learning performs these operations with its own decisions without human intervention. This situation highlights the functionality of deep learning algorithms in the analysis of images. The use of deep learning models with computer vision has offered high accuracy rates and classification opportunities in object recognition and detection processes. Detection and recognition operations from images in the dataset stand out with their use in fields such as military, health, autonomous vehicles, and unmanned aerial vehicles.

CNN, one of the deep learning models, shows high performance in the processing and recognition of images. It is observed that the CNN model is used in deep learning in terms of use in operations such as recognition and classification of images in cameras, medical images, autonomous vehicles, and face recognition. In the field of image object detection, algorithms based on deep learning architectures such as YOLO, SSD, R-CNN, Fast R-CNN, and Faster R-CNN have been used with high efficiency in studies. While some of these algorithms perform object detection faster, others perform object detection more accurately. The algorithm to be used must both save time and perform the object detection process accurately. These elements play a critical role in determining the performance of the method to be used.

Adverse conditions experienced as a result of operations such as UAV cameras, challenging weather conditions, and the detection of small objects in high regions are disadvantages for object detection. Bayram and Nabiyevev [1] detected camouflaged tanks by comparing YOLOv5, YOLOv6, YOLOv7, and YOLOv8 algorithms. When the values of the four algorithms are examined, it is observed that the YOLOv6 architecture has the highest detection rate. It stands out compared to other architectures with a 0.983 mAP50 value, 0.966 precision, 0.935 recall, and 0.950 F1 score values. In this report, studies on the recognition and detection of targets from images have been examined. The fundamentals of deep learning and image processing are mentioned. Algorithms frequently used for object detection in deep learning models have been examined and compared. A literature review of studies conducted with deep learning models in object detection has been performed.

Image Processing Fundamentals

Traditional computer vision models use basic image processing algorithms to solve object detection and classification problems. Image processing is the process of arranging digital images in a way suitable for the desired purpose using computer algorithms and visual techniques. In image processing, all operations are performed on pixels. After the initial image processing step is performed on images taken from cameras, the feature extraction process belonging to objects is carried out [2]. Computers cannot process analog data directly and assign numerical values by dividing the image into pixels. Digital image processing deals with converting an analog image into a digital format and then processing it with digital computers for various purposes (enhancement, restoration, classification, compression, understanding, and interpretation).

Deep Learning and CNN Model

Deep learning is an artificial intelligence technology used to analyze data on a computer, inspired by the functioning of the human brain. In other words, it is a machine learning model that helps to perform tasks requiring human intelligence. It consists of neurons and many interconnected artificial neural networks. It aims to learn data with these artificial neural networks. Deep learning models mostly consist of an input layer, hidden layer, and output layer.

The CNN (Convolutional Neural Network) algorithm is an artificial neural network model used in image-based object definition. This model can recognize objects in new and previously unseen visuals by training from a large number of sample images of the object from different angles [3]. The CNN architecture, which is one of the frequently used models in the field of image processing in deep learning, consists of many layers. It consists of a convolution layer, pooling layer, fully connected layer, and classification layer.

In the convolution layer, feature maps are created using filters. in the pooling layer, unnecessary details are reduced by reducing the output coming from the convolution layer to lower dimensions. The fully connected layer maps the outputs from the convolution and pooling layers to classes, and activation functions are used in this layer. Finally, the error value is calculated by taking the difference between the predicted value and the actual value. This error value is reduced by updating the parameters with the backpropagation algorithm [4]. The layers of the CNN model are given below [5].

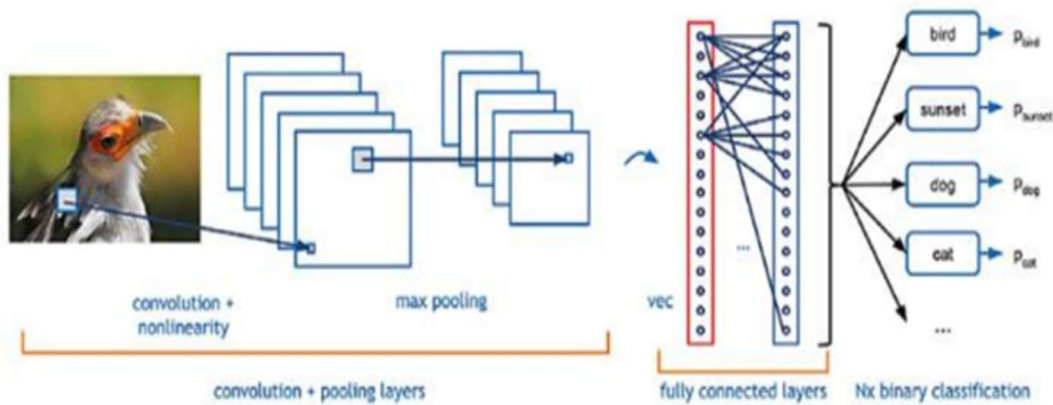


Figure 1: CNN Model

suppression (NMS) method to obtain the final detection results [13]. Object detection is performed by generating a feature map by adding a pyramid-shaped CNN model on top of the network structure [14]. Unlike YOLO, by adding different features to the CNN architecture, it finds object locations by selecting the highest confidence rate from different regions of the object according to the grid structure it is in [15].

R-CNN

R-CNN is an algorithm that analyzes the object in each region by dividing the image into regions. R-CNN generates region proposals to determine areas that might be objects. Methods such as selective search divide the image into small parts according to color, texture, and shape, then combine similar parts to create larger regions of interest. It was developed to find classes belonging to images and bounding boxes belonging to these objects. An estimated 2000 candidate regions are determined by selective search and sent to the CNN layer [16]. Support vector machines are used for the classification process. Since each image requires applying CNN to 2000 regions separately, its training takes a very long time.

Fast R-CNN

It is the improved version of the R-CNN model. The difference of Fast R-CNN from R-CNN is that the CNN architecture and SoftMax classifier are used first on the input image. While R-CNN first divides the image into 2000 regions, Fast R-CNN processes the image as a whole with the CNN architecture in one go [17]. After the image is first passed through the convolution layer and the pooling layer, a convolution feature map is created. With the Region of Interest (RoI) pooling layer, the feature vector of the feature map is extracted and fed to the fully connected layer. Finally, these feature vectors are transmitted to the SoftMax classifier and the regression layer that predicts the bounding box locations for each class [18].

Faster R-CNN

The efficiency of the Selective Search method is low due to it being slow and high cost. It is a method developed to increase the efficiency in the Fast R-CNN algorithm. Shaoqing Ren and colleagues proposed a new object detection architecture that completely eliminates the requirement for the selective search step and enables region proposals to be learned directly by the network. Faster R-CNN proposed using the Region Proposal Network (RPN) method for the object proposal process instead of the Selective Search method and CPU-based region proposal approaches. In this way, region proposals can be produced at a much higher speed and computational efficiency is significantly increased by running the entire pipeline on the GPU [19].

Object Detection Literature Review

Object Detection in Thermal Cameras and Infrared

Thermal cameras can be used in places with little to no light. In the study conducted by Önal et al., object detection processes were carried out using various classification algorithms in the form of house, car, human, and animal by using Alexnet, Googlenet, Resnet-18, Resnet-50, Resnet-101, Inceptionv3, Densenet201 designs, which are among the architectures of the CNN model, from deep learning-based methods on images obtained from thermal cameras [20].

A deep learning model named YOLO-MST has been designed considering the YOLOv5 model for the development of infrared small target detection methods. An attempt was made to increase target detection performance by making additions to the backbone, neck, and head parts found in the structure of the YOLO algorithm. mAP was calculated as 99.5% in the IRIS dataset. In SIRST datasets, 95.8% precision and 91.8% recall values were obtained [21].

Object Detection in Autonomous Vehicles

In the study [22], lane tracking and sign detection operations were performed using image processing and deep learning algorithms in autonomous driving. YOLOv2, YOLOv11, and MicronNet models in

YOLO algorithms have produced effective results in different usage areas. This situation demonstrates the usability of deep learning algorithms in autonomous vehicles.

Unmanned Aerial Vehicles Target Detection

In the study conducted by Saygılı and Özmen [23], object detection was performed by looking at the suitability of learned visuals with images taken by UAV using SSD MobileNet, which is a convolutional neural network model among deep learning models. In this study, a 69.45% mAP average precision value was obtained.

Using an unmanned aerial vehicle, object detection was performed by descending with movement in the X, Y, Z axes. Unlike traditional image processing techniques, moving target detection was performed using deep learning models. Faster R-CNN was used as the deep learning model. Vehicle classification and pedestrian detection processes were carried out to find solutions to some problems in traffic using a camera on the unmanned aerial vehicle. Using YOLOv5, one of the object detection algorithms used in deep learning, the mean average precision value (mAP) was found to be 0.9 [24].

Images taken from the unmanned aerial vehicle tried to detect objects that are circular in shape and red in color. Image processing techniques were realized from the OpenCV module in the Python application. Here, color thresholding and additional filtering methods were used [25].

CONCLUSION

The process of object detection from images falls into the field of computer vision. Significant developments have occurred in object detection with the combination of computer vision and deep learning algorithms. First of all, before giving the raw image we have to the method we want to use, it is brought to a usable state using image processing techniques. Then, the stage of target recognition operations from the image is started. Target detection from images and object recognition operations are used in many areas such as autonomous vehicles, unmanned aerial vehicles, thermal cameras, and military vehicles. Various methods are used in object detection. Traditional methods such as Haar, SIFT, HOG can be used. The use of deep learning algorithms from developing modern methods appears with high accuracy rates. CNN, two-stage R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN models and single-stage methods such as YOLO, SSD are used in target detection and object recognition operations in deep learning models. Among these algorithms, YOLO and SSD models stand out compared to other models in terms of processing speed. However, negativities experienced in operations such as challenging weather conditions and detection of small objects in high regions are disadvantages. Very low resolutions or noise can negatively affect object detection operations. Improvements should be made in the detection and recognition of small objects in unmanned aerial vehicles and autonomous vehicles. Improvements should also be made regarding the difficulties experienced in object recognition systems in cameras, especially in challenging weather conditions.

REFERENCES

- [1] A. F. Bayram and V. Nabyev, "Derin öğrenme tabanlı saklanan kamufle tankların tespiti: Son teknoloji YOLO ağlarının karşılaştırmalı analizi," *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 13, no. 4, pp. 1082–1093, 2023.
- [2] S. Solak and U. Altınışık, "Görüntü işleme teknikleri ve kümeleme yöntemleri kullanılarak fındık meyvesinin tespit ve sınıflandırılması," *Sakarya University Journal of Science*, vol. 22, no. 1, pp. 56–65, 2018.
- [3] D. E. Çekiç, *Yapay zeka derin öğrenme algoritmaları ile MR görüntüleri ve ameliyat sırasındaki mikroskop görüntüleri kullanılarak tümör sınıflaması yapılması ve tümörün normal beyin dokusundan ayırt edilmesinin sağlanması*, Uzmanlık tezi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Anabilim Dalı, Marmara Üniversitesi Tıp Fakültesi, İstanbul, Türkiye, 2022.
- [4] Ö. İnik and E. Ülker, "Derin öğrenme ve görüntü analizinde kullanılan derin öğrenme modelleri," *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, vol. 6, no. 3, pp. 85–104, 2017.
- [5] B. Zahal, *Detecting Airplanes in UAV Images Using Deep Learning Model*, Yüksek lisans tezi, Defense Technology, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Türkiye, 2025.

- [6] G. Yiğit, "Crowd detection: Leveraging YOLO for human recognition," *Turkish Journal of Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 571–577, 2025.
- [7] Y. Bayav, *Derin öğrenme ile termal görüntülerden askeri nesne tespiti*, Yüksek lisans tezi, Askerî Elektronik Sistemler Mühendisliği, Millî Savunma Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2025.
- [8] B. Yıldırım and G. Cagıl, "Bir montaj parçasının derin öğrenme ve görüntü işleme ile tespiti," *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, vol. 3, no. 2, pp. 31–37, 2020.
- [9] E. Karaköse and M. Aksu, "İnsansız hava araçlarında nokta bulutu verisi kullanılarak iniş pisti uygunluk analizi," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 36, no. 2, pp. 535–551, 2024.
- [10] M. E. Atik, Z. Duran, and R. Özgünlük, "Comparison of YOLO versions for object detection from aerial images," *International Journal of Environment and Geoinformatics*, vol. 9, no. 2, pp. 87–93, 2022.
- [11] M. T. Zeren, S. K. Aytulun, and Y. Kirelli, "Comparison of SSD and Faster R-CNN algorithms to detect airports using UAV and satellite imagery," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 19, pp. 643–658, 2020.
- [12] J. Meng *et al.*, "A MobileNet-SSD model with FPN for waste detection," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 1425–1431, 2022.
- [13] W. Liu *et al.*, "SSD: Single shot multibox detector," in *Proc. European Conf. on Computer Vision (ECCV)*, Springer, 2016.
- [14] J. Yi, P. Wu, and D. N. Metaxas, "ASSD: Attentive single shot multibox detector," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 189, art. no. 102827, 2019.
- [15] B. İpek, *Derin öğrenme temelli nesne tespiti algoritmalarının insansız hava araçlarında uygulanması*, Lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2018–2019.
- [16] E. Arkin *et al.*, "A survey: Object detection methods from CNN to transformer," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 82, no. 14, pp. 21353–21383, 2023.
- [17] A. H. Hasan *et al.*, *İnsansız hava araçlarında nesne tespiti ve takibi*.
- [18] R. Girshick, "Fast R-CNN," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV)*, 2015.
- [19] S. Çiftçi, *İnsansız hava araçları vasıtasıyla karasal görüntüler üzerinden nesne tespiti*, Yüksek lisans tezi, Bilgisayar Mühendisliği Bilim Dalı, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2025.
- [20] M. K. Önal *et al.*, "Termal kamera görüntülerinin çoklu sınıflandırılması için derin öğrenme tabanlı tekniklerin performans karşılaştırılması," *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 12, no. 25, pp. 60–71.
- [21] T. Yue *et al.*, "YOLO-MST: Multiscale deep learning method for infrared small target detection based on super-resolution and YOLO," *Optics & Laser Technology*, vol. 187, art. no. 112835, 2025.
- [22] M. A. R. Alif, "YOLOv11 for vehicle detection: Advancements, performance, and applications in intelligent transportation systems," *arXiv preprint arXiv:2410.22898*, 2024.
- [23] Z. Saygılı and G. Özmen, "İnsansız hava araçlarında gömülü sistem üzerinden derin öğrenme ile nesne tespiti," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 34, pp. 292–298, 2022.
- [24] H. Zhang *et al.*, "Research on object detection and recognition method for UAV aerial images based on improved YOLOv5," *Drones*, vol. 7, no. 6, art. no. 402, 2023.
- [25] İ. Soyhan, S. Gurel, and S. A. Tekin, "Yapay zeka tabanlı görüntü işleme tekniklerinin insansız hava araçları üzerinde uygulamaları," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 24, pp. 469–473, 2021.

YAPAY ZEKA TABANLI CİHAZ KESTİRİMCİ BAKIMI: TEORİK VE YAZILIMSAL BİR İNCELEME

Hebatallah Imran Alı ALI¹

Özet – Bu çalışma, yapay zeka tabanlı kestirimci bakım sistemlerinin teorik ve yazılımsal yönlerini inceleyerek endüstriyel süreçlerde arıza tahmini ve bakım optimizasyonunun nasıl gerçekleştirildiğini ortaya koymaktadır. Endüstri 4.0 ile birlikte üretim hatlarında IoT sensörleri, büyük veri analitiği ve makine öğrenmesi modelleri yaygınlaşmış bu durum bakım stratejilerinin reaktif veya periyodik olmaktan çıkarak veri odaklı ve öngörülebilir bir yapıya dönüşmesini sağlamıştır. Kestirimci bakım sistemlerinde sensör verileri gerçek zamanlı olarak toplanmakta, ön işleme aşamalarından geçirildikten sonra makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarına aktarılmaktadır. Çalışmada Random Forest, SVM ve LSTM gibi yöntemlerin arıza sınıflandırma, anomali tespiti ve kalan kullanım ömrü (RUL) tahmini üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca MQTT tabanlı gerçek zamanlı izleme, model performans metrikleri ve karar destek mekanizmalarının bakım süreçlerine entegrasyonu ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, yapay zeka destekli kestirimci bakımın plansız duruşları azaltarak maliyet verimliliği sağladığını, üretim güvenliğini artırdığını ve ekipman ömrünü uzattığını göstermektedir. Çalışma, gelecekte dijital ikiz, federatif öğrenme ve otonom bakım sistemlerinin bu alanda kritik rol üstleneceğini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimesi –Kestirimci Bakım; Yapay Zeka; Makine Öğrenmesi; Sensör Verileri; Arıza Tahmini

GİRİŞ

Endüstri 4.0 ile birlikte üretim sistemlerinde dijitalleşme hız kazanmış bu dönüşüm sonucunda siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği ve yapay zeka gibi teknolojiler endüstriyel süreçlerin temel bileşenleri haline gelmiştir. Bu teknolojik gelişmeler, işletmelerin yalnızca üretim verimliliğini artırmakla kalmamış aynı zamanda bakım stratejilerinde köklü bir paradigma değişimine yol açmıştır [2]. Geleneksel bakım yaklaşımları olan reaktif ve periyodik bakım yöntemleri, yüksek maliyet, plansız duruş ve verimsizlik gibi önemli sorunlara sahiptir. Bu nedenle, ekipman sağlığını sürekli izleyen ve arıza gerçekleşmeden önce öngörü sağlayan kestirimci bakım (Predictive Maintenance) yaklaşımı giderek daha fazla önem kazanmıştır [1], [3].

Kestirimci bakım sistemleri, sensörlerden elde edilen sıcaklık, titreşim, akım, basınç gibi çok boyutlu verilerin analiz edilmesine dayanır. Bu veriler gerçek zamanlı olarak toplanmakta, ön işleme süreçlerinden geçirilmekte ve ardından makine öğrenmesi ile derin öğrenme modellerine aktarılmaktadır [4]. Yapay zeka algoritmaları, bu verilerdeki örüntüleri öğrenerek olası arıza eğilimlerini tespit edebilmekte, cihazın kalan kullanım ömrünü (Remaining Useful Life – RUL) tahmin edebilmekte ve bakım planlarının doğru zamanda oluşturulmasını sağlamaktadır [3], [5].

Son yıllarda yapılan çalışmalar, LSTM, CNN, Random Forest ve SVM gibi modellerin arıza tespiti ve RUL tahmini gibi kritik görevlerde yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir [3], [5]. Bu doğrultuda, yapay zeka tabanlı kestirimci bakım sistemleri yalnızca maliyetleri azaltmakla kalmamakta üretim güvenliğini artırmakta, enerji verimliliğini iyileştirmekte ve ekipman ömrünü uzatarak sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sunmaktadır [6].

Bu çalışmanın amacı, yapay zeka tabanlı kestirimci bakım kavramının teorik temelini ve yazılımsal uygulama süreçlerini inceleyerek sistemin endüstriyel ortamlardaki rolünü bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktır. Çalışma kapsamında veri toplama süreçleri, ön işleme teknikleri, makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri ile gerçek zamanlı izleme mekanizmaları ele alınmıştır. Böylece kestirimci bakımın hem akademik hem de pratik yönleri bütüncül bir çerçevede değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Yapay zeka tabanlı kestirimci bakım sistemlerinin teorik altyapısı sensör verilerinin toplanması, bu verilerin işlenmesi, uygun özelliklerin çıkarılması, makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarının

uygulanması, son olarak da tahmin sonuçlarının karar destek mekanizmalarıyla bütünleştirilmesi üzerine kuruludur. Bu bölümde, kestirimci bakım süreçlerinde kullanılan materyaller ve yöntemler kavramsal düzeyde ele alınmaktadır.

Kullanılan Materyaller (Teorik Yapı): Kestirimci bakımın temel materyalleri, makine üzerine yerleştirilen sensörlerden elde edilen çok boyutlu verilerden oluşur. Titreşim, sıcaklık, akım, voltaj, basınç ve dönen ekipman ivmesi gibi parametreler, makine sağlık durumunun sayısal temsillerini oluşturur [1], [2]. Bu sensörlerden gelen veriler zaman serisi yapısında olup kestirimci bakım modellerinin giriş katmanını oluşturur.

Sensör verilerine ek olarak operasyonel veriler (çalışma saati, yük miktarı, çevresel koşullar) ve bakım geçmiş kayıtları da modelleme için teorik materyal niteliğindedir [3]. Bu veri çeşitliliği, hem arıza oluş sebeplerinin anlaşılması hem de çoklu değişken ilişkilerinin analiz edilmesi açısından önemlidir.

Verilerin depolanması için IoT tabanlı izleme altyapıları, MES/SCADA sistemleri ve bulut veri platformları kullanılmakta bu altyapı gerçek zamanlı kestirimci bakım için gerekli veri sürekliliğini sağlamaktadır [4].

Kullanılan Yöntemler (Teorik Yaklaşımlar)

Veri Ön İşleme: Kestirimci bakım modellerinin doğruluğunu belirleyen en önemli aşamalardan biri veri ön işlemedir. Ham sensör verileri genellikle gürültü, eksik gözlem ve ani sıçramalar içerdiği için filtreleme, normalizasyon, istatistiksel dengeleme ve pencereleme gibi süreçlerden geçirilir [1]. Bu işlemler yapay zeka modellerinin doğru örüntüleri öğrenebilmesi için temel hazırlayıcı katmandır.

Özellik Çıkarımı (Feature Extraction): Makine öğrenmesi modellerinin etkin çalışabilmesi için zaman ve frekans alanında çeşitli özellikler elde edilir. RMS, ortalama, tepe değer, varyans, spektral enerji ve bant gücü gibi ölçümler arıza belirtilerinin teorik göstergeleri olarak kabul edilir [2], [3]. Bu süreç, sensör verisini anlamlandıran ve modellerin veri içerisindeki davranışları tanımlamasını sağlayan temel yöntemlerdir.

Makine Öğrenmesi Yöntemleri: Sınıflandırma, anomali tespiti ve arıza olasılığı tahmini için Random Forest, Support Vector Machines (SVM), Naive Bayes ve Gradient Boosting gibi algoritmalar kullanılır [3], [5]. Bu modeller, sensör verilerindeki örüntüleri analiz ederek ekipmanın normal çalışma durumu ile anormal durumları kavramsal olarak ayırt eder.

Derin Öğrenme Yöntemleri: LSTM ağları, zaman serisi verilerindeki uzun dönem bağımlılıklarını analiz ettiği için kestirimci bakımda yaygın bir yöntemdir [4]. LSTM yapısı, makine davranışının gelecekteki eğilimlerini tahmin etmeye olanak sağlayan teorik bir modelleme yaklaşımı sunar.

CNN tabanlı yapılar ise sensör verisinin spektrogram formuna dönüştürüldüğü durumlarda güçlü bir özellik öğrenme mekanizması sağlar. Böylece arıza imzaları otomatik olarak çıkarılabilir [5].

Karar Destek Yapıları: Modellerden elde edilen tahminler, bakım planlama sistemleri ve operasyon yönetim araçlarıyla bütünleştirilerek karar destek mekanizmasını oluşturur. Tahmin edilen arıza olasılıkları, kalan kullanım ömrü (RUL) değerleri ve anomali skorları, bakım zamanlaması için temel göstergeler olarak değerlendirilir [2], [4].

Teorik Model Akışı

Kestirimci bakım sistemlerinin genel işleyiş akışı aşağıdaki kavramsal adımlardan oluşur:

1. **Veri Toplama:** Sensörlerden ve operasyonel kaynaklardan sürekli veri alınması [1].
2. **Ön İşleme:** Gürültünün azaltılması, eksik verilerin düzenlenmesi, ölçekleme işlemleri [2].
3. **Özellik Çıkarma:** Zaman ve frekans alanı özelliklerinin oluşturulması [3].
4. **Modelleme:** Makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerinin uygulanması [4], [5].
5. **Tahmin:** Arıza ihtimali, ekipman sağlığı skoru ve RUL tahmini gibi çıktılar.
6. **Karar Destek:** Bakım planlama ve operasyon süreçlerinin yönlendirilmesi [2].

Bu akış, literatürde önerilen yapay zeka tabanlı kestirimci bakım modelleri ile uyumlu kavramsal bir çerçeve sunmaktadır.

Yazılımsal Yaklaşımların Teorik Açıklaması

Yapay zeka tabanlı kestirimci bakım sistemlerinde yazılımsal mimari, çok katmanlı bir analiz ve karar üretim süreci olarak yapılandırılmıştır. Bu mimari, sensör verilerinin yalnızca işlenmesiyle sınırlı kalmayıp, verinin sistem içinde nasıl aktığı, hangi yazılım bileşenleri tarafından değerlendirildiği ve sonuçların işletme süreçlerine nasıl entegre edildiği üzerine kuruludur. Bu nedenle yazılımsal yaklaşım, veri boru hattı (data pipeline), model yönetimi, gerçek zamanlı mesajlaşma altyapısı ve karar destek mekanizmalarının teorik yapısını kapsar [1], [2].

Veri Boru Hattı ve Yazılım Katmanlarının Teorik İşleyişi: Kestirimci bakım yazılımı, sensörden gelen veriyi uç noktada (edge) toplayan, işleyen ve merkezi sisteme ileten çok katmanlı bir mimariyi takip eder. Bu yapı, üç temel katmandan oluşur:

- Uç katman (Edge Layer): Veriyi ilk karşılayan yazılımsal katmandır. Gürültü azaltma, basit normalizasyon ve eşik temelli ön kontroller burada gerçekleşir. Bu yapı sistemin gecikmesini azaltmak için donanımın yakınına konumlandırılır [2], [4].
- Platform katmanı (Platform Layer): Verilerin zaman damgalı biçimde depolandığı ve makine öğrenmesi modellerinin çalıştırıldığı merkezi yazılım yapısıdır. Burada veri akışı mesaj kuyruğu sistemleriyle (MQTT, Kafka vb.) yönetilir. Böylece sensör verisi ile analiz modülü arasında kesintisiz iletişim sağlanır.
- Uygulama katmanı (Application Layer): Model çıktılarını işleyerek cihaz sağlığı göstergeleri, arıza olasılığı ve RUL tahmini gibi yüksek seviyeli sonuçlar üretir. Bu katman karar destek sisteminin çekirdeğini oluşturur [3].

Bu yapı, donanım ve yazılımın senkronize biçimde çalışmasını sağlayan teorik temel bileşendir.

Model Yönetimi ve Öğrenme Sürecinin Teorik Yapısı: Yapay zeka modellerinin kestirim performansını koruyabilmesi için yazılım mimarisi dinamik bir model yönetim sistemine ihtiyaç duyar. Bu sistem şu işlevleri içeren teorik bir çerçevedir:

- Model güncelleme döngüsü: Sensör verisi zaman içinde değiştiği için modeller belirli periyotlarla yeniden eğitilir. Bu süreç “model drift” etkisini azaltmayı hedefler [5].
- Çoklu model entegrasyonu: Sınıflandırıcı, regresyon ve anomali tespit modelleri birbirini tamamlayacak şekilde paralel çalışabilir. Örneğin LSTM, RUL tahmini yaparken, RF modeli yalnızca anormal davranışları izleyebilir.
- Model seçim teorisi: Yazılım mimarisi, her cihaz tipi için en iyi performansı veren modeli otomatik olarak seçen bir meta-öğrenme yapısı içerebilir. Bu yapı literatürde “model orchestration” olarak geçer [6].

Bu süreçlerin tamamı yazılımsal karar yapılarına dayanır ve kestirimci bakımın doğruluğunu belirleyen temel mekanizmalardır.

Olay Tabanlı Karar Üretimi (Event-Driven Architecture): Kestirimci bakım sistemlerinin yazılımsal temelinde olay tabanlı mimari yer alır. Bu mimari, her sensör değişiminin bir “olay” olarak değerlendirilmesi ve bu olayın ilgili yazılım modülleri tarafından işlenmesi üzerine kuruludur.

Örneğin:

- Titreşim ani yükseldi → Anomali tespit modülü tetiklenir.
- Sıcaklık sınırı geçti → Eşik tabanlı alarm sistemi devreye girer.
- Model RUL tahminini kritik seviyede gördü → Bakım planlama modülü güncellenir.

Bu yapı, bakım kararlarının yalnızca periyodik analizlere değil sistemdeki her küçük değişime duyarlı şekilde üretilmesini sağlar [4], [6].

Gerçek Zamanlı İzleme Sisteminin Teorik Mimarisi: Gerçek zamanlı kestirimci bakım çözümleri, yalnızca veri depolama ve modellemeden ibaret değildir. Aynı zamanda canlı bir izleme sistemi gerektirir. Teorik olarak bu sistem şu altyapılardan oluşur:

- Gerçek zamanlı veri akışı (stream processing)
- Anlık model değerlendirmesi
- Alarm üretim modülleri
- Operasyon ekranları için veri görselleştirme altyapısı

Bu mimari üretim hattında milisaniyelik gecikmelerle çalışan sistemlerde kritik önem taşır [2].

Dijital İkiz ve Sanal Simülasyon Yaklaşımlarının Teorik Çerçevesi: Modern kestirimci bakım uygulamalarının yazılımsal açıdan en ileri boyutlarından biri dijital ikiz (digital twin) yaklaşımıdır.

Bu yapı:

- Fiziksel makinenin davranışını yazılım üzerinde simüle eder,
- Gerçek sensör verisini model tahminleriyle karşılaştırır,
- Sanal ortamda “deneme-yanılma” yapılmasını sağlar [5].

Böylece arıza senaryoları, bakım stratejileri ve performans değerlendirmeleri gerçek üretimi durdurmadan yazılımsal olarak incelenebilir.

Sistemin Blok Şeması, Akış Diyagramı ve Algoritmik Yapısının Teorik Açıklaması

Yapay zeka tabanlı kestirimci bakım sistemlerinin çalışma mantığı, birbirine bağlı çok katmanlı bir mimari üzerinde şekillenir. Bu mimari verinin toplanması, işlenmesi, modellenmesi ve bakım kararlarına dönüştürülmesi gibi aşamalardan oluşur. Blok şeması, akış diyagramı ve algoritma analizi, bu aşamaların birbirine nasıl bağlandığını sistematik bir çerçevede göstermektedir [1], [2]. Bu bölümde, söz konusu yapının teorik bileşenleri açıklanmaktadır.

Sistemin Blok Şeması: Katmanlar Arası Teorik Yapı

Bir kestirimci bakım sisteminin blok şeması, verinin sensörlerden başlayarak karar mekanizmasına kadar izlediği yolu temsil eden katmanlardan oluşur. Genel olarak sistem dört ana bileşene ayrılır:

Sensör ve Saha Katmanı: Makinenin fiziksel durumunu ölçen titreşim, sıcaklık, basınç, akım, nem gibi sensörler bu katmanda yer alır. Bu katman sistemin en temel veri kaynağıdır ve bakım kararlarının doğruluğu büyük ölçüde bu verilerin güvenilirliğine bağlıdır [1], [3].

Edge / Veri Toplama Katmanı: Sensörlerden gelen ham veri, kenar cihazlar (edge gateways) tarafından ilk kez işlenir. Gürültü azaltma, zaman damgalama ve paketleme işlemleri bu seviyede gerçekleşir. Bu katman, yüksek hacimli verinin daha verimli şekilde merkezi sisteme aktarılmasını sağlar [2].

Veri İşleme ve Modelleme Katmanı: Bu katmanda veriler temizlenir, normalleştirilir ve zaman pencerelerine ayrılır. Ardından elde edilen özellikler makine öğrenmesi veya derin öğrenme modellerine aktararak arıza olasılığı, anomali skoru, kalan kullanım ömrü (RUL) gibi çıktılar üretilir [3], [4], [5].

Karar Destek ve Uyarı Katmanı: Model tahminleri belirlenen eşiklerde değerlendirilir. Kritik durum oluştuğunda sistem alarm üretir, bakım emri oluşturur veya operatöre bildirim gönderir. Bu sayede bakım süreci reaktif olmaktan çıkar, proaktif hale gelir [2], [6]. Bu blok yapı, sistemin uçtan uca bilgi akışını gösteren teorik iskelet niteliğindedir.

Sistemin Akış Diyagramı: Sürecin İşleyiş Mantığı

Akış diyagramı, verinin sistem içinde hangi sırayla işlendiğini açıklayan dinamik bir süreç haritasıdır. Yapay zeka tabanlı kestirimci bakımda genel süreç aşağıdaki gibi işler:

1. **Veri Toplama:** Sensörler sürekli veri akışı sağlar [1].
2. **Veri Doğrulama:** Eksik, tutarsız veya sıradışı değerler kontrol edilir.
3. **Ön İşleme:** Filtreleme, normalizasyon ve pencereleme yapılır [3].
4. **Özellik Çıkarma:** Zaman alanı (RMS, varyans), frekans alanı (FFT bant enerjileri) gibi özellikler çıkarılır [3], [4].
5. **Model Analizi:** Makine öğrenmesi / derin öğrenme modeli, gelen veri penceresini değerlendirir [4], [5].
6. **Tahmin Üretimi:** Sistem arıza riski, anomali skoru veya RUL değeri üretir [4].
7. **Karar Aşaması:**
 - Değer normal aralıktaysa → İzleme devam eder.
 - Risk yüksekse → Alarm tetiklenir ve bakım planı devreye girer [6].
8. **Geri Besleme:** Model performansı izlenir ve gerektiğinde yeniden eğitilir [5].

Bu süreç, sistemin her yeni veriyle kendini güncelleyen bir döngü halinde çalışmasını sağlar.

Algoritmanın Teorik Yapısı: Kestirimci Model Mantığı

Algoritmik yapı, sistemin yapay zeka ile nasıl “düşündüğünü” açıklayan kavramsal süreçtir. Kod içermez; yalnızca modelin karar mekanizmasını teorik olarak tanımlar.

Girdi Aşaması: Algoritma, belirli bir zaman penceresi içinde toplanan sensör verilerini alır. Bu pencereler sistemin makinenin son durumunu değerlendirmesi için gereklidir [1].

Özellik Vektörü Oluşturma: Veri penceresindeki davranış, istatistiksel ve spektral özelliklere dönüştürülür. Böylece ham veri daha anlamlı bir matematiksel temsil kazanır [3], [4].

Tahmin Algoritması: Model iki farklı yoldan biriyle çalışır:

- Sınıflandırıcı (Classification): “Normal / Arızalı / Riskli” değerlendirmesi yapar.
- Regresyon Modeli: Cihazın kalan kullanım ömrünü (RUL) sayısal olarak tahmin eder [4], [5].

Bazı sistemlerde bu iki yaklaşım birlikte kullanılır (multi-model approach).

Karar Kuralı: Model çıktıları belirlenen eşiklerle karşılaştırılır:

- Arıza olasılığı > eşik → Alarm
- RUL < kritik süre → Bakım önerisi
- Anomali skoru yüksek → Makine yakın izlemeye alınır [6]

Geri Besleme Mekanizması: Algoritma zamanla yeni verileri öğrenir ve model, güncellenmiş davranışa göre yeniden eğitilebilir. Bu, sistemin makinedeki değişimlere uyum sağlamasını mümkün kılar [5].

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışma, yapay zeka tabanlı kestirimci bakım sistemlerinin endüstriyel süreçlerdeki önemini ve uygulama potansiyelini ortaya koymuştur. Sensör verilerinin toplanması, bu verilerin ön işleme süreçlerinden geçirilmesi ve makine öğrenmesi ile derin öğrenme yöntemleri kullanılarak arıza tahmini yapılması, modern üretim hatlarında proaktif bakım anlayışını mümkün kılmıştır. Literatürde yer alan çalışmalar da kestirimci bakımın plansız duruşları azaltarak üretim verimliliğini artırdığını ve bakım maliyetlerini önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir [1], [4].

Random Forest, SVM, LSTM ve CNN gibi modellerin farklı veri türlerini işleyebilme kapasitesi, kestirimci bakım sürecinin çok yönlü bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır. Özellikle LSTM tabanlı zaman serisi modellerinin kalan kullanım ömrü (RUL) tahminlerinde yüksek doğruluk sağlaması, bakım zamanlamasının daha isabetli yapılmasına katkıda bulunmaktadır [3], [5]. Bu durum, üretim ekipmanlarının güvenli ve sürdürülebilir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Çalışmanın bulguları, gelecekte kestirimci bakım sistemlerinin daha akıllı ve daha otonom yapılara evrileceğini göstermektedir. Dijital ikiz teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte cihazların sanal kopyaları üzerinde gerçek zamanlı simülasyonlar yapılabilecek ve bu simülasyonlar bakım kararlarını daha güçlü bir şekilde destekleyecektir [2]. Ayrıca federatif öğrenme gibi veri gizliliğini koruyan yöntemlerin yaygınlaşması, farklı üretim merkezleri arasında model paylaşımını mümkün kılarak yapay zeka modellerinin genellenebilirliğini artıracaktır [3].

Bununla birlikte, derin öğrenme yöntemlerinin karmaşıklığı ve modellerin çoğunlukla “kara kutu” gibi davranması, açıklanabilir yapay zeka çalışmalarının önemini artırmaktadır. Bu nedenle, gelecekte kestirimci bakım alanında hem yüksek doğruluk sağlayan hem de karar süreçlerini açıklayan hibrit yaklaşımların öne çıkması beklenmektedir [5], [6]. Ayrıca enerji verimliliği ve sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda, kestirimci bakım sistemlerinin çevresel etkileri azaltmaya yönelik stratejilerle bütünleştirilmesi gerekmektedir [6].

Sonuçta, yapay zeka destekli kestirimci bakım sistemleri, endüstriyel işletmelerin güvenliğini, verimliliğini ve maliyet optimizasyonunu artıran stratejik bir teknolojidir. Sensör verilerinin doğru işlenmesi, güçlü modelleme tekniklerinin uygulanması ve yeni nesil dijital teknolojilerin entegrasyonu ile bu sistemlerin geleceğin akıllı fabrikalarında temel bir bileşen haline geleceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, “A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.04.005>
- [2] J. Lee, B. Bagheri, and H. A. Kao, “A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems,” *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18–23, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- [3] X. Li, Q. Ding, and J. Q. Sun, “Remaining useful life estimation in intelligent manufacturing using deep learning approaches,” *Measurement*, vol. 145, pp. 305–324, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107000>
- [4] Z. Wang and X. Jin, “A hybrid prognostic framework for intelligent predictive maintenance using deep learning and statistical models,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 115543–115556, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3003934>
- [5] Zhang, C. Yang, and W. Zhao, “Deep learning-based predictive maintenance: A review of trends and challenges,” *Applied Soft Computing*, vol. 104, 107233, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107233>
- [6] M. Kaya and H. Demir, “Endüstri 4.0 kapsamında yapay zeka tabanlı kestirimci bakım uygulamaları,” *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 9, no. 2, pp. 78–92, 2022.

APPLICATIONS AND FUTURE USES OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMERS (CFRP) IN THE DEFENSE INDUSTRY

Ahmet Türkyılmaz^{1*} Hakan TERZİOĞLU^{2**}

Abstract – In today's defense systems, lightness, high mechanical strength, multifunctionality, and low radar visibility have become increasingly critical. In this article, carbon fiber-reinforced polymers (CFRP) stand out as advanced engineering materials of strategic importance due to both their structural efficiency and electromagnetic properties. This study examines forty-one sources published between 1999 and 2025 to comprehensively evaluate the current applications of CFRP in the defense industry and future trends. The literature shows that CFRP significantly reduces weight while increasing structural strength in aerospace platforms, efficiently dissipates impact energy in ballistic armor systems through multi-layered architectures, and enhances stealth capabilities through radar-absorbing structures and metamaterials. Furthermore, nano-additives, hybrid composite designs, metamaterial-based RAM solutions, and advanced manufacturing methods offer innovative research areas that will further expand the functional role of CFRP in future high-performance defense platforms.

Keywords – Carbon Fiber-Reinforced Polymers (CFRP); Defense Industry; Lightweight High-Strength Structures; Radar-Absorbing Materials (RAM); Metamaterials; Ballistic Protection

INTRODUCTION

History and basics of composite materials

Composite materials are engineering products that combine different phases to produce mechanical and functional properties that no single component can provide on its own. The development of fiber-reinforced polymers in the modern sense gained momentum particularly in the second half of the 20th century, reaching a critical position in the aerospace and defense sectors with the increasing demand for high strength-to-weight ratios. As stated in the National Research Council's pioneering report, high-performance structural fibers (primarily carbon fiber) combined with polymer matrices offer a unique combination of lightness, strength, and thermal stability [1]. These properties have led to advanced polymer matrix composites (PMCs) becoming the primary structural material in aerospace and defense applications.

The superiority of CFRP in engineering design stems from the fibers acting as load-bearing ribs, combining the matrix's load transfer, environmental protection, and shaping functions. Soutis' work on aerospace composites shows that carbon fiber is rapidly replacing metal materials due to its high Young's modulus, low density, and fatigue resistance [2], [3]. This transformation has not only enabled structural weight reduction but has also contributed to extended mission durations and increased maneuverability in military platforms where strength-to-weight ratios are critical. Indeed, comprehensive assessments of composite material standards in the aviation sector reveal that CFRP design and production processes are now central to platform engineering [5], [32], [33].

Along with developments in the defense industry, the functional expectations of composite materials have also changed; multifaceted performance criteria such as electromagnetic absorption, thermal stability, delamination resistance, and ballistic energy dissipation have come to the fore, not just mechanical strength. Comprehensive reviews published in recent years show that this multifunctionality has been further enhanced by enriching the polymer matrix structure of CFRP with nano-additives, hybrid fiber arrangements, and functional coatings [6], [9], [12], [24], [28]. Studies on

hybrid composites for defense applications have revealed that combinations of glass, aramid, and carbon fibers offer significant advantages in terms of ballistic and structural resistance [31]. In addition, CFRP-based metamaterials offer new design principles aimed at electromagnetic wave absorption and radar visibility reduction; this topic is addressed in detail in recent research on the optimization of advanced wave-absorbing polymer composites for aeronautical applications [14], [21], [34].

The historical development of CFRP is also directly related to advances in production technologies. Evaluations of autoclave curing, RTM, filament winding, and advanced 3D composite printing techniques show that production processes have reached a high level of maturity in terms of lightness, integrity, defect control, and large-scale part manufacturing [12], [33]. This process also enables the production of more complex, multifunctional, and mission-oriented composite structures in the defense sector.

In conclusion, the entire literature shows that CFRP emerged historically from aerospace needs but has now become a critical strategic material in almost every area of defense, such as ballistic armor, radar-absorbing surfaces, UAV platforms, and electromagnetic protection systems [1]–[34]. Thus, CFRP should be considered not merely a structural component but a multifunctional and transformative core material for modern defense technologies.

Why did the defense industry switched to CFRP?

The defense industry has been going through a transformation for many years in the selection of structural materials due to criteria such as lightness, strength, fatigue life, radar visibility, and ballistic resistance, which are the fundamental parameters determining the performance of platforms. Although metal alloys such as aluminum and titanium have been used as the main structural materials in military aircraft, armored vehicles, and missile systems throughout the 20th century due to their high strength, their specific weights and fatigue behavior have begun to fall short of meeting the needs of modern defense doctrines. In this context, carbon fiber reinforced composites (CFRP) have emerged as a strategic alternative in defense platforms due to the multiple advantages they offer compared to metal materials [1], [2], [5], [10], [28].

Precursor studies on aerospace composites have revealed that CFRP offers 4–8 times higher specific strength and significantly lower density compared to traditional metals [2], [3]. Therefore, critical performance gains such as fuel efficiency, increased range, and maneuverability are achieved through weight reduction, particularly in fighter aircraft, helicopter rotor blades, UAV bodies, and missile coatings [13], [23], [32], [33]. The inherent high fatigue resistance and corrosion resistance of CFRP also contribute to reducing maintenance costs, particularly in unmanned systems designed for marine platforms and long-term missions [9], [12], [24].

Another important factor in the defense sector's shift towards CFRP is the design flexibility of composites. By changing the fiber orientation, matrix type, layer sequences, and hybrid fiber combinations, different mechanical and electromagnetic properties can be obtained on a single material [6], [18], [31]. This engineering advantage has created a significant difference compared to metals; it has enabled the production of surface-embedded antennas, electromagnetic absorber panels, and frequency-selective composites, especially in stealth-focused air and land platforms designed to reduce radar cross-section. [4], [7], [14], [16], [20], [21], [26], [29], [34]. Indeed, the literature clearly shows that CFRP functions not only in structural load-bearing systems but also as an active component of invisibility technology.

Another factor driving the rise of CFRP in the defense industry is the ballistic performance of composite materials. Recent studies have shown that multi-layered panels based on carbon fiber or

hybrid fibers are more effective at energy dissipation compared to metal armor, and that delamination-controlled layer sequences provide specific resistance against high-speed impacts [11], [17], [19], [22]. These findings have led to the rapid proliferation of CFRP-based solutions in areas such as armored vehicle coatings, personal protective systems, and counter-drone defense structures [25], [28].

Advances in production technologies have also been a significant factor accelerating the transition from metal to CFRP. Autoclave, RTM, automated fiber placement (AFP), filament winding, and 3D composite printing techniques have made it possible to economically produce large-scale, flawless, and lightweight defense components [12], [33]. This technological maturation has made CFRP a suitable engineering material for mass production across all defense sectors, particularly in air platforms.

Today, many critical defense applications, such as the F-35, Eurofighter, TAI platforms, modern ballistic protection systems, low radar cross-section structures, and new-generation missile systems, benefit from the performance gains offered by CFRP. Studies in the literature show that CFRP will continue to replace metal materials on an increasingly large scale, not only due to its lightness and strength, but also due to its multifaceted advantages such as electromagnetic behavior, thermal stability, fatigue resistance, and formability.

Needs of the Defense Industry

Lightweighting is the most critical requirement in modern defense systems. Reducing weight in airborne platforms delivers significant improvements in performance parameters such as range, climb capability, payload capacity, and fuel efficiency. In land and sea vehicles, lightweighting enhances mobility and directly contributes to operational continuity by reducing logistical burden. The current literature [2], [10], [23], [32] shows that CFRP has become one of the most effective engineering materials meeting this requirement thanks to its specific strength advantage.

Another important requirement is the simultaneous provision of high mechanical strength and long-term structural stability. Modern platforms must withstand both sudden impact loads and long-term fatigue conditions. The structural optimization offered by CFRP's fiber orientation provides superior performance compared to metal alloys in such complex loading scenarios [18], [22], [35]. This situation produces solutions compatible with current defense requirements, particularly in UAV bodies, missile casings, armored vehicle panels, and helicopter rotor components.

Another important parameter of modern defense doctrines is low radar visibility, i.e., low radar cross-section (RCS) requirements. The delayed detection of platforms by enemy radars creates a decisive advantage in modern operations. Due to its dielectric properties and structure suitable for surface modification, CFRP has become a fundamental component in the development of radar-absorbing materials (RAM), metamaterial coatings, and electromagnetic signature reduction systems, which play a critical role in stealth technologies [4], [7], [14], [16], [21], [26], [29], [34].

One of the current needs of the defense industry is multifunctionality and system integration capability. New generation engineering approaches aim for a single structural material to perform both a carrier function and additional functions such as electromagnetic absorption, thermal management, vibration damping, or structural health monitoring. Studies on nanocomposite and hybrid materials in the literature [20], [30], [31], [34] indicate that future defense platforms will be equipped with multifunctional structures.

In addition to all this, production efficiency, sustainability, and ease of maintenance have also become critical in the defense industry. Considering both the costs of traditional production methods and the difficulties of maintenance processes, the corrosion resistance and long-lasting structure of CFRP provide significant reductions in life cycle costs [12], [28], [33]. Advancing production

techniques (RTM, out-of-autoclave curing, 3D printing-based composite production) are becoming increasingly critical in meeting the defense sector's expectations for speed, scalability, and repeatability.

Considering all these parameters, the literature [1–35] shows that the current requirements of the defense industry are shifting towards lightweight, durable, low-visibility, multifunctional, and high-performance materials, with CFRP-based composites at the center of this transformation.

MATERIALS AND METHOD

Carbon Fiber Production Processes

Carbon fiber production is a complex process involving multiple chemical and thermomechanical steps, where the raw material is redesigned at the molecular level until it becomes the final product. It forms the basis of high-performance composite materials used in defense industry applications. Comprehensive reviews in the literature show that approximately 90% of carbon fibers used in commercial and military applications today are produced from polyacrylonitrile (PAN)-based precursors, while the remainder are obtained from pitch, rayon, or other polymer-based precursors [36]–[41]. The main reason PAN-based precursors are dominant on this scale is that they provide a much higher carbon yield (around 50–60%) compared to other alternatives and offer the possibility of controlled microstructure development during the spinning stage and the ability to provide an optimum balance between high tensile strength and elasticity modulus, which are critical in defense applications. Park [36] and Frank et al. [37] emphasize that the molecular orientation capability of the PAN precursor directly increases the impact absorption capacity sought in armor technologies.

The carbon fiber production process is generally described in four main stages that follow each other and each depend on the success of the previous one: precursor production, stabilization (oxidation), carbonization, and graphitization. Each of these stages involves critical parameters that determine the final fiber performance. For example, in the stabilization stage, which is the slowest and most energy-intensive step in the production chain, polymer chains must be subjected to thermal treatment in the 200–300 °C range to convert them into a “ladder” type non-flammable aromatic structure [38], [39]. In the subsequent carbonization stage, high temperatures (1000–1700 °C) applied in an inert environment remove heteroatoms from the structure, enabling the fiber to gain its ultimate strength. Precise control of these production parameters directly affects many outputs in defense-oriented CFRP applications, from the material's ballistic resistance to radar invisibility (stealth), structural rigidity, and fatigue life. Edie and McHugh [41] report that the graphitization step, which can be added at the end of the process, greatly increases the elastic modulus, providing indispensable properties for aerospace components, but that this process alters the cost/performance balance.

Precursor Production and the Importance of Molecular Structure

The production of PAN precursors is a critical fundamental step in determining carbon fiber performance. The final mechanical (modulus, strength) and thermal properties of carbon fiber are primarily determined by the molecular structure of the polyacrylonitrile (PAN) precursor and the process parameters. Park [36] states that the molecular weight, chain regularity (tacticity), and copolymerization ratio of acrylonitrile copolymers used in precursor production directly affect the degree of crystallinity and graphitization capacity of carbon fiber. These molecular parameters form the basis of the microstructural regularity of the final carbon fiber by controlling the kinetics and homogeneity of cyclization reactions during oxidative stabilization. Frank et al. [37] define this process as a “chemical architecture” problem that determines the final modulus–strength relationship of carbon fiber. This is because the regular alignment of PAN chains along the fiber axis allows for more controlled and homogeneous structural transformations during the stabilization and carbonization stages, enabling the production of high-strength and high-modulus fibers. For this reason, advanced

precursor properties such as higher linearity, narrower molecular weight distribution, and specific comonomer ratios are preferred in high-performance carbon fibers developed for critical structural applications in the defense industry (e.g., fighter jet wing boxes, missile bodies) [40].

Spinning of the precursor into fibers using techniques such as wet spinning, dry spinning, or dry-jet wet spinning is the second critical step in the process. This stage determines the degree of chain orientation within the fiber, which directly affects the efficiency and homogeneity of all subsequent thermochemical reactions, such as stabilization, carbonization, and graphitization [37], [38]. For example, the dry-wet spinning method can provide superior molecular alignment and lower internal porosity within the fiber, particularly for high-modulus fibers. The structural transformation undergone by the resulting PAN precursor fiber during subsequent oxidative stabilization is one of the most important steps in determining the mechanical properties of the final carbon fiber. During this thermal treatment, PAN chains are heated in a controlled manner at 200-300°C in the presence of atmospheric oxygen and converted into a stable ladder polymer structure. Shin et al. [39] emphasize that optimizing this process, particularly with new oxidation methods, can shorten the stabilization time while increasing the structural homogeneity of the fiber along its cross-section, thereby simultaneously improving production efficiency and fiber quality. Following the stabilization of these PAN fibers, they are subjected to carbonization (1000-1500°C) and, if necessary, graphitization (above 2000°C) in an inert atmosphere at high temperatures. This results in the final carbon fiber, which has high strength and high modulus values, with carbon atoms arranged in regular graphite-like layers. [37],

[41]. Edie and McHugh [41] state that the temperature profile, applied stress, and atmosphere control in the final thermal steps shape the fiber's crystal size, orientation, and defect density, which in turn determine whether the fiber is classified as high-strength or high-modulus. For advanced composite applications in the defense industry, including structural components on platforms like the F-35 Lightning II [2], producing high-modulus and high-strength carbon fibers requires a highly sophisticated manufacturing process with tight control over all precursor design and thermochemical steps described above.

Stabilization (Oxidation) Process

The most critical and most sensitive step in carbon fiber production from PAN, is the oxidative stabilization phase. This stage is designed to impart thermal stability to the fibers, preventing them from melting or degrading during the subsequent high-temperature carbonization process. In this thermal process, which is typically carried out in a controlled manner within a temperature range of 200–300 °C in the presence of oxygen, the linear structure of the PAN polymer chains is converted into an aromatic-cyclic ladder polymer structure thru cyclization and oxidation reactions[38],[39].

Shin et al. [39] emphasize that stabilization is the most energy-intensive and time-consuming stage in the fiber production line. In most commercial production processes, approximately 50% of the total production time is spent at this stage, as a slow temperature ramp (approximately 1-5 °C/minute) and a long isothermal holding time are required for the reactions to complete across the fiber cross-section and to ensure homogeneous thermal conversion. The primary reactions that occur during this process are cyclization (the bonding of nitrile groups to form stable cyclic structures), dehydrogenation (the release of hydrogen gas), and oxygen binding (the addition of oxygen- containing functional groups to the molecular chains). These reactions make the fiber thermally stable even at temperatures above its melting point[37],[38].

The quality and homogeneity of stabilization have a decisive impact on the mechanical performance of the final carbon fiber. Even the slightest irregularity at this stage can cause the reaction rate (extent of reaction) to vary across the fiber cross-section. This irregularity creates significant thermal stress differences within the fiber during the subsequent carbonization phase (typically in an inert

atmosphere at 1000-1500°C). This situation can lead to consequences such as the formation of microcracks in the microstructure of the final fiber, the accumulation of internal fiber stress, low density, and ultimately a significant decrease in mechanical properties (especially tensile modulus and elongation at break) [37], [41]. Therefore, advanced control of the stabilization process is essential for high-quality carbon fibers required for critical applications such as defense industries (e.g., medium modulus-high strength grade). This control includes techniques such as precise temperature profile optimization, stabilization under stress (to maintain molecular alignment), and the use of modified atmospheres (e.g., gradually increasing oxygen concentration) [39]. These optimizations not only improve mechanical properties but also have the potential to increase production efficiency by shortening the process time, as noted by Shin et al. [39]. In conclusion, stabilization is the most vital transformation and quality-determining point in the chain, spanning from the molecular architecture of the precursor [36], [37] to the final high-tech performance of carbon fiber [2], [40].

Carbonization Stage

The stabilized PAN fibers are heated in a controlled manner to a temperature range of 1000–1500 °C in an inert atmosphere (usually nitrogen or argon) during the carbonization stage. The main purpose of this high-temperature thermal treatment is to remove heteroatoms such as oxygen, hydrogen, and nitrogen from the fiber's structure as a gas phase (in the form of H₂O, HCN, NH₃, N₂, CO, CO₂), typically increasing the carbon content to levels between 92-99% and transforming the fiber into a structure composed almost entirely of carbon atoms [38]. This off-gassing process results in a loss of approximately 40-50% of the fiber's mass and increases its density.

Carbonization temperature has a direct and critical impact on the mechanical properties of the final carbon fiber. As Yusof and Ismail [38] and Ozkan et al. [40] also noted, increasing carbonization temperature generally leads to a stable increase in the fiber's elastic modulus (Young's modulus) by promoting a more ordered alignment of carbon atoms (growth of aromatic layers). However, this relationship is not linear and there is an optimal point. While extremely high temperatures (well over 1500°C) further enhance the perfect alignment of carbon layers (basal planes), they can also lead to the growth and increase in the number of microstructural defects (voids, microcracks)

within the fibers. This situation leads to a decrease in the fiber's elongation at break (strain to failure) and consequently an increase in brittleness [37], [41]. In conclusion, optimizing the carbonization temperature and duration is essential to achieve a balance between high modulus and sufficient toughness. For example, in structural defense applications requiring both high stiffness and fatigue resistance, such as aircraft wings, high-strength and intermediate modulus (IM) carbon fibers are often preferred, which are typically produced by carbonizing at around 1500°C [2], [40].

During carbonization, the microstructure of the fiber transforms into a turbostratic graphitic structure, where carbon atoms are arranged in hexagonal rings but lack the perfect three-dimensional order of graphite. In this structure, the graphene layers are parallel to each other but are stacked irregularly. The quality of this process, meaning microstructural homogeneity, crystal size (La, Lc), and crystal orientation, determines the final performance of the fiber [38], [41]. High-quality carbonization allows for the formation of larger and better-oriented crystallites with fewer internal defects.

These microstructural characteristics have a direct impact on composite performance in defense applications. For example:

In Ballistic Panels: In multi-layered hybrid armor exposed to high-speed impacts [14], [19], a homogeneous microstructure increases resistance to penetration by effectively distributing impact energy along the fibers.

In Missile and UAV Bodies: In missile bodies [40] and the load-bearing composite structures of unmanned aerial vehicles (UAVs/drones) [25], a homogeneous microstructure significantly increases the material's fatigue resistance and stability under high-frequency vibrations.

In Hypersonic Platforms: Particularly in platforms subjected to extreme thermomechanical loads, such as hypersonic vehicles, microstructural homogeneity becomes a critical parameter for reducing microcracking caused by thermal stresses and, consequently, the risk of sudden catastrophic (instantaneous and total) failures [34]. Therefore, in defense-oriented CFRP designs, not only the choice of fiber type (HM, HS, IM) but also ensuring this fundamental microstructural quality achieved during the manufacturing process (especially during carbonization) plays a key role.

Graphitization and Production of High Modulus Fibers

The graphitization stage is the final thermal processing step required to produce “ultra-high modulus” carbon fibers used in the defense and aerospace industries. This process is a critical step that determines the final mechanical properties of high-performance structural fibers [1]. Edie and McHugh [41] state that graphitization is carried out at very high temperatures of 2000–3000 °C under an inert atmosphere and that during this stage, the carbon atom planes (graphitic layers) become largely aligned within the crystal structure, gaining a long-range order. This microstructural refinement significantly increases the fiber's flexural modulus (E-modulus) while potentially causing a partial decrease in tensile strength. Graphitization enables the production of carbon fibers with E-moduli exceeding 600 GPa while maintaining low density.

As detailed by Soutis, this superior specific stiffness (stiffness/density ratio) is indispensable for platforms where weight reduction is one of the most important goals, such as in aerospace vehicles [2], [3], [5], [10]. Composites made from such ultra-high modulus fibers provide critical advantages in advanced defense applications such as:

Main Bodies of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Both strategic and tactical UAVs require minimum weight and maximum structural stability for maximum payload capacity and range. High-modulus CFRPs minimize aerodynamic flexure in the thin, long wing structures and fuselages of these platforms, thereby increasing flight stability and precision [13], [23].

Radar Absorbing Panels and Stealth Structures: CFRPs can be used not only as structural elements but also as functional materials. High-graphite-content carbon fibers and their nano-filled hybrid composites can provide broadband radar absorption due to their electrical conductivity and dielectric properties [7], [16]. This forms the basis of the structural-stealth (material-structure-function integration) concept [21], [14].

Structural Elements of Long-Range Missiles: When used in missile bodies and solid fuel casings, high modulus and low weight reduce launch weight while providing the necessary rigidity against aerodynamic and inertial loads generated during high speed and maneuvering [11], [32].

High-Precision Guidance Systems (Guidance Systems): Optical/electro-optical payloads used for target tracking and guidance require stable platforms. The mounting structures and protective housings of these systems must be extremely rigid to minimize the effects of vibration and thermal distortion. Ultra-high modulus CFRPs also play a critical role here.

Precision Defense Platforms Requiring Vibration Damping: Controlling structural dynamic behavior is of vital importance in platforms such as submarine periscopes, satellite dish antennas, or precision electronic warfare systems. The high internal damping characteristics of composites produced with graphitized fibers contribute to the reduction of such vibrations.

However, graphitization is one of the most expensive stages, significantly increasing production costs and energy requirements [12], [24]. Therefore, this process is unnecessary in many defense applications where medium modulus (250-350 GPa) fibers are sufficient (e.g., some armored personnel carrier components, ammunition boxes). However, in high-end military platforms (5th generation fighter jets, high-altitude UAVs, spacecraft) where a high stiffness–low density combination is required and performance takes precedence over cost, ultra-high modulus carbon fibers and, consequently, the graphitization process are indispensable [31], [28].

Inspection of CFRP manufacturing technologies for defense applications

The production of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) varies greatly depending on the matrix system used, the fiber architecture, and the performance requirements of the final application. In the defense industry, different manufacturing technologies are used to produce both structural and functional composite components. Each of these technologies is of strategic importance because they directly affect parameters such as mechanical performance, thermal stability, radar absorption capacity, ballistic resistance, and weight optimization. In the literature, autoclave manufacturing is particularly prominent for aerospace components requiring high pressure and high accuracy; RTM-based manufacturing for large-surface or complex-geometry defense structures; AFP/ATL technologies for rapid and automation-based manufacturing; and 3D printing-assisted composite approaches for innovative topology designs [12, 24, 33, 40].

The basic methods of defense-oriented CFRP production are explained in detail below
Autoclave Assisted Composite Production

The autoclave method has become the industry standard in aerospace-grade CFRP production, optimizing resin flow, layer density, and void content under high pressure (4–7 bar) and controlled temperature. Harris et al. [32], [33] state that the mechanical properties of autoclave-produced composites are more homogeneous compared to other methods and are therefore preferred in critical military air platforms (such as F-35, A400M, and national UAV/S- UAV platforms). This homogeneity is one of the most fundamental requirements for structural reliability in aerospace engineering [5], [10].

The main advantages of the autoclave method are directly related to the superior material properties it provides. The high pressure applied (4–7 bar) enables the effective removal of volatile components and trapped air within the laminate, allowing for an extremely low void ratio of typically less than 1%. This low porosity significantly increases the composite's fatigue strength, long life under continuous load, and impact resistance [12], [24]. At the same time, the homogeneous pressure distribution ensures complete wetting of the fiber clusters and excellent interfacial adhesion with the resin. This excellent fiber-matrix bond improves structural damping by reducing the propagation of high-frequency vibrations; this property is critical for the dynamic performance of components such as aircraft fuselages and wings [33]. Furthermore, the autoclave process plays a decisive role in the production of functional composites. Carbon-based electromagnetic absorbers, such as carbon nanotubes and graphene oxide, placed between layers or at a specific depth, ensure homogeneous distribution and flawless embedding within the matrix. This compatibility is a fundamental requirement for achieving broadband radar absorption performance without compromising structural integrity [7], [14], [21].

Disadvantages include high equipment and operating costs, the need for an autoclave of the same size for large parts, and relatively long cycle times [12], [24]. However, in military aviation applications, particularly on platforms such as manned combat aircraft and strategic unmanned systems, autoclave technology maintains its strategic importance because structural reliability and performance often take precedence over production cost [28], [31].

Resin Transfer Molding

Resin Transfer Molding (RTM) is a closed production process based on the injection of low-viscosity resin into a closed mold and its subsequent curing, used for manufacturing complex geometries. The main reasons for preferring RTM in structural defense components include high geometric accuracy, smooth surfaces on both sides and mold-derived surface quality, repeatability, and the cost and labor advantages it offers in large-scale production [12], [24]. This method provides better mechanical properties and environmental emission control compared to traditional hand lay-up, especially in medium and high-volume production.

RTM applications in the defense industry are quite diverse. These include lightweight and complex curved composite panels for armored vehicles, aerodynamic composite outer skins for missile bodies, primary and secondary structural components carrying high loads such as helicopter tail booms, and the production of sandwich panels with radar-absorbing properties [12], [31]. The closed mold structure of the process provides high control over lay-up and fiber volume fraction in such applications, which is fundamental to predictable and reliable mechanical performance.

In the literature, the capabilities of RTM technology are also being investigated in combination with nanotechnology to produce advanced functional composites. In particular, studies on the processability of resins modified with carbon nanotubes, graphene, or other nano-scale fillers using RTM [30], [34] aim to increase both mechanical strength and electrical conductivity or magnetic permeability. These developments are of critical importance for military platforms requiring multifunctionality, such as electromagnetic absorption (stealth), lightning protection, or structural health monitoring [16], [21]. Furthermore, the RTM process can be adapted to thermoplastic and thermoset hybrid systems or entirely thermoplastic matrices (e.g., PEEK, PEKK). This compatibility enables thermoplastic matrix composites, which provide enhanced impact resistance, crack resistance, and recyclability, to be increasingly preferred in defense applications such as impact-resistant composite armor systems and blast-resistant panels [22], [28]. As a result, RTM continues to maintain its position as an indispensable production technology in the defense industry, striking an optimal balance between performance, complexity, and production efficiency [13].

AFP / ATL (Automated Fiber Placement / Automated Tape Laying)

Automatic Fiber Placement (AFP) and Automatic Towel Laying (ATL) systems are advanced manufacturing technologies that enable the high-speed, automated placement of prepreg (pre-resin-impregnated) tape or fiber bundles on complex surfaces in predefined orientations via robotically controlled heads. This technology is considered groundbreaking for the defense industry for the following reasons:

Advanced Fiber Orientation Control: It enables the optimization of stress distribution in wing box structures, UAV bodies, and missile structures. This precise control allows the exact amount of material required to withstand loads in a specific direction to be placed exactly where needed, maximizing weight optimization and structural efficiency [32].

Reduced Error Rate: Human error is minimized; it guarantees repeatability, especially in radar-absorbing panel layers and complex corner details that require high precision. Automation greatly reduces inconsistencies, warping, and the risk of air bubble formation associated with manual placement [12], [24].

Ability to Produce Large-Scale and Complex Components: It enables the production of large components such as wing spars, composite fuel tanks, long beams, and stringer structures in a single

piece with minimized joints. This increases structural integrity and reduces assembly costs [33].

Harris [32] states that this method is used in a large portion of the composite surfaces of modern fighter jets and optimizes the fiber orientation architecture much more precisely than traditional manual placement methods. The contribution of AFP/ATL is not limited to efficiency; these systems also significantly reduce material waste, as cutting and placement are optimized by computer [24]. Furthermore, these technologies play a key role in the production of hybrid and functional structures. For example, by programmatically placing different types of fibers (carbon, glass, aramid) or prepreg tapes containing conductive nanofillers within the same structure, specific regions can be endowed with mechanical, electromagnetic absorption, or lightning protection properties [16], [34]. This capability is indispensable for the development of next-generation platforms that require material-structure-function integration [13], [21]. However, the high initial investment cost, complex programming, and engineering requirements of these systems often limit their use to high-value, large-scale defense and aerospace projects [31].

Filament Winding

Filament winding is one of the most efficient and suitable methods for producing continuous fiber-reinforced composite materials, particularly pressure-resistant cylindrical, spherical, or conical symmetrical structures. This process is based on the principle of robotically winding continuous fiber yarn or prepreg tape onto a rotating mandrel at pre-calculated angles (helical, circumferential, or polar) under controlled tension. It is widely preferred in the manufacture of the following critical components in defense applications that require a high strength-to-weight ratio and superior pressure resistance:

Rocket and Missile Motor Cylinders: The structural housings of solid fuel rocket motors require maximum resistance to internal pressure and high temperatures. Carbon/epoxy or carbon/thermoplastic cases produced by filament winding are much lighter than traditional metal alternatives, which directly increases the launch vehicle's payload capacity and range [12], [31].

Pressurized Composite Tanks: Ideal for liquid hydrogen, oxygen, or air storage tanks used in military aircraft, spacecraft, and missiles. The process allows for the optimization of fiber angles in the tank's neck, cylindrical body, and dome sections to withstand different internal pressure loads [13], [33].

Submarine and Missile Bodies: The torsional rigidity required for high resistance to external hydrostatic pressure and underwater maneuverability can be precisely designed using filament winding. Additionally, carbon fiber's corrosion resistance ensures a long service life against the corrosive effects of seawater [28].

Thermal and Structural Components of Hypersonic Platforms: Extreme aerothermal loads generated during hypersonic flight require advanced thermal protection systems (TPS) and high-temperature resistant structural components. The processing of high-purity carbon fibers combined with ceramic matrix composites (CMC) or special thermoplastics using filament winding opens the way for the production of lightweight and durable structures for these extreme conditions [13], [30].

The fundamental advantage of this method stems from the fiber being wound under highly controlled tension. This allows the full potential of ultra-high modulus carbon fibers to be realized; the fibers are tightly packed and, thanks to their initial stresses, perform more efficiently under load [41]. The winding angle, the most critical design parameter, directly determines the mechanical behavior of the component. Helical windings resist axial and torsional loads, while circumferential (hoop) windings resist internal pressure loads. As emphasized by Edie and McHugh [41], this angle optimization significantly affects behavior under multi-axial loading and ballistic impact resistance. The angular arrangement between layers controls the distribution of impact energy and penetration resistance, making this method a valuable design-production interface for ballistic protection applications (light

armored cylindrical modules) [11], [19], [22]. Its main disadvantage is that it is limited to parts with only rotational symmetry (closed surfaces) and requires complex tooling and programming. However, the superior structural efficiency it provides makes it indispensable, especially for strategic launch systems and platforms.

3D Printing-Based CFRP Production (Continuous Fiber Reinforced AM)

In recent years, additive manufacturing (3D printing) technologies have offered strategic advantages in the defense industry, not only for prototyping but also for the rapid and flexible production of structural and functional components intended for final use. Continuous carbon fiber reinforced 3D printing technologies enable the production of complex geometries with high mechanical performance without the traditional mold costs and constraints [24], [34]. Prominent productions in the defense sector using this method include:

Topologically optimized structural components: It is possible to produce minimal, organically shaped brackets, connections, and intermediate structures calculated using finite element analysis (FEA) that follow only stress paths. This enables weight reduction in military platforms to be taken to the extreme [13].

Radar-absorbing composite geometries and metastructures: Geometries that are nearly impossible to manufacture using traditional methods, such as gradient porosity, hollow labyrinth channels, or periodic lattice structures, can be specifically printed to absorb or deflect electromagnetic waves. This is one of the most concrete examples of material- structure-function integration [14], [21].

Lightweight and integrated fasteners for UAV components: They are an ideal solution for the rapid production of components requiring low-volume and high customization, such as fuselage-wing joints, landing gear housings, or sensor mounting platforms in small and medium-sized unmanned aerial vehicles [28].

Rapidly producible and personalized armor geometries: In applications such as body armor insert plates or vehicle protection panels, the production of composite plates with complex internal filler structures (gyroid, lattice) optimized for a specific threat profile or anatomical fit is being investigated [22].

The greatest advantage of 3D printing methods is the ability to directly produce hollow, lattice-type, topologically optimized, or metamaterial-based composite structures from digital designs, which would be impossible or excessively costly to produce using traditional methods (mold casting, milling) [30]. This offers new possibilities, especially for stealth designs, as the complex surface geometries, angled channels, and absorber layer topologies required to reduce the radar cross-section (RCS) can be created with precision [16], [21]. Furthermore, it paves the way for the development of smart or adaptive composite surfaces where materials with different properties (conductive, insulating, magnetic) are used regionally within the same structure [34]. The main limitations are the relatively low speed of serial production, the limits of the printing volume, and the fact that the interlayer strength in continuous fiber-reinforced prints can be lower than in traditional prepreg laminates [24]. However, particularly in the context of rapid prototyping, personalized solutions, and the production of functional structures that cannot be traditionally replicated, additive manufacturing is solidifying its position as a complementary technology that is transforming the production spectrum in the defense sector [13].

Thermoplastic CFRP Production Techniques

Thermoplastic matrix CFRPs are playing an increasingly strategic role in defense applications due

to their rapid formability, superior impact toughness, and recyclability potential compared to thermoset matrices (epoxy, polyester). Carbon fibers combined with high-performance thermoplastics such as polyetheretherketone (PEKK), polyetheretherketone (PEEK), and polyphenylene sulfide (PPS) can be rapidly shaped under heat and pressure and retain this form after cooling. This process is completed in a much shorter time compared to traditional thermoset curing cycles. Systems such as thermoforming, hot pressing, and rapid heat transfer molding (e.g., welding or consolidation) provide a distinct production advantage, particularly in ballistic armor systems targeting mass production and complex geometries, explosion-resistant panels, and parts requiring high impact energy absorption. [12], [22], [28].

The basic advantages of thermoplastic CFRPs in the defense industry can be summarized as follows. High impact toughness stems from the ductile behavior of the thermoplastic matrix and its energy absorption capacity. This property is a decisive factor in the performance of ballistic protection modules (personal body armor insert plates, vehicle spall liners) and lightly armored vehicle components exposed to collision/explosion effects [11], [19], [22]. The rapid production cycle stems from the fact that thermoplastic composites can melt and solidify in minutes or seconds, as opposed to the hours-long curing processes of thermoset resins. This makes high-volume military component production (ammunition boxes, UAV wing profiles, portable equipment parts) economical and efficient, while also increasing supply chain speed [12], [24], [28]. Recyclability and repairability offer long-term strategic sustainability and logistical advantages. Damaged or end-of-life thermoplastic CFRP components can be reshaped

by applying heat or undergo physical recycling processes. This increases resource efficiency and reduces life cycle costs, while also enabling rapid repairs in the operational field [28], [31].

Strategic Evaluation of Technology Selection in the Defense Industry

The selection of CFRP production technology in defense applications is not only a manufacturing process but also a strategic design decision that directly influences the operational capabilities of the platform. This selection requires optimization based on multiple and often conflicting parameters, such as part geometry, static and dynamic load conditions, radar cross-section (RCS) reduction requirements, expected ballistic threat level, and environmental resistance (temperature, humidity, chemical exposure) conditions [12], [13], [31]. Therefore, specific manufacturing methods or hybrid combinations have become standard for different platforms and components.

For example, fifth-generation stealth aircraft surfaces require both structural integrity and electromagnetic absorption performance. Therefore, the autoclave process, which provides a high fiber volume fraction and low porosity, is standard for the primary structural panels of these platforms. However, for the precise optimization of fiber orientation to control the radar reflection properties in these panels with complex curvatures, it is combined with Automated Fiber Placement (AFP) technology. This combination simultaneously optimizes structural rigidity, weight, and stealth performance [10], [21], [32].

For lightweight composite armor plates, the focus is on producing complex 3D geometries and reinforcement elements as a single piece, maximizing impact resistance, and ensuring mass production efficiency. Here, Resin Transfer Molding (RTM) with a closed mold structure is preferred. Particularly when used as a hybrid system with thermoplastic matrices (e.g., PEEK, PEKK) that provide superior impact and penetration resistance, RTM offers an ideal production interface for ballistic protection modules [22], [28], [40].

Hypersonic missile components and rocket motor casings operate under extreme thermomechanical loads. In these applications, filament winding technology, which provides maximum structural efficiency against axial and internal pressure loads, is indispensable. To fully utilize the potential of

this method, it is essential to use carbon fibers that have undergone a special graphitization process, offering high temperature resistance and ultra-high modulus [11], [13], [41].

For platforms such as Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), low production volumes, rapid design iterations, and extreme lightweight requirements are paramount. Here, 3D printing (additive manufacturing) technology comes into play, enabling the production of topologically optimized, hollow lattice-structured components without mold costs. For load-bearing elements requiring high mechanical performance, a hybrid approach using traditional lamination methods with continuous carbon fiber reinforced prepreg tapes can be adopted [13], [24], [34].

Ultimately, CFRP production technologies are not merely a manufacturing preference for the defense industry. These technologies are strategic design components that directly determine a platform's final performance, radar visibility, speed and maneuverability limits, ballistic survivability, and thus overall mission effectiveness [4], [25], [28].

RESULTS AND DISCUSSIONS

Aerospace & Structural Applications

The use of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in defense aviation has increased over the past twenty years, and today a large portion of the fuselage, wings, tail unit, cowlings, fuel tank, flight control surfaces, and critical internal structural components of modern military aircraft are made of composite materials [2], [10], [13]. This transformation is particularly evident in fifth-generation fighter aircraft, unmanned aerial vehicles (UAVs), and advanced helicopters. The primary reason for CFRP's strong adoption in aviation is its superior specific strength and specific modulus values compared to traditional aluminum and titanium alloys [1], [5], [10], [28]. This fundamental property enables the following critical performance parameters, which directly determine strategic and tactical advantages:

Long Range and High Payload Capacity: The 20-30% weight reduction provided by CFRPs means that the same fuel load can be used to achieve a longer range or carry a greater payload of weapons, sensors, and electronic warfare systems for the same range [2], [13]. This directly increases the platform's operational flexibility and effectiveness.

Superior Maneuverability: The combination of low weight and high rigidity reduces the aircraft's inertia moments, allowing for higher angular acceleration rates (roll, pitch, yaw). This directly improves agility, providing a critical advantage in air combat [5], [31].

Radar Cross Section (RCS - Stealth): They are not natural radar reflectors like metallic structures. More importantly, CFRPs can be designed to absorb or scatter radar signals [4], [7]. Wideband radar absorptive properties can be imparted to composite structures by integrating nanofillers such as carbon black, carbon nanotubes, or ferrite, which increases the platform's stealth [8], [16], [21], [29].

Low Fuel Consumption and Operating Cost: Every kilogram reduction in weight results in significant fuel savings over the platform's lifetime. Furthermore, the excellent corrosion resistance of CFRPs significantly reduces maintenance requirements and life-cycle costs (LCC) compared to metallic structures [10], [24].

Design Flexibility and Structural Integration: CFRPs are anisotropic materials that allow loads to be specifically directed due to their layered structure. This enables the production of complex, aerodynamically shaped, and large, monolithic structures (e.g., integration of the wing box with the

fuselage) that are impossible with traditional metals. This increases structural efficiency while reducing the number of parts, fasteners, and assembly time [32], [33], [12].

As a result, CFRPs are not merely a material alternative, but a technological paradigm shift that redefines platform performance, survivability, and operational economics in defense aviation. Therefore, they are expected to continue playing a central role in the development of future advanced air platforms [13], [28], [34].

Structural Performance and Mechanical Superiority

Composite materials offer versatile mechanical advantages compared to metals with isotropic properties. Thanks to the controllability of parameters such as fiber orientation, layer arrangement, and matrix selection, CFRP structures are anisotropic materials that can be designed for specific loading conditions. This design flexibility enables them to exhibit optimized and superior behavior under both axial loads and shear (shear) loads [12], [18].

One of the most striking results of this advantage is fatigue performance. The studies examined indicate that the fatigue strength of CFRP is approximately 3–7 times higher than that of aluminum alloys of equivalent weight [13], [18], [23], [32]. The fundamental reason for this difference is that the mechanisms of fatigue crack initiation and propagation in CFRP are radically different from those in metals. While cracks in metallic structures start and propagate in a single region, damage (matrix cracking, delamination, fiber breakage) in CFRPs spreads throughout the load cycles, providing a “damage tolerance” that prevents sudden fracture [32]. This feature provides a much longer service life and lower maintenance requirements compared to metallic counterparts in critical areas exposed to repeated aerodynamic and inertial loads, such as wing boxes, spars, stringers, and ribs [10], [23].

Another critical advantage of CFRP is its high stiffness-to-weight ratio, which is vital, especially in high-speed tactical jets and unmanned combat aerial vehicles (UCAVs). For example, the immense bending and torsional loads generated within the wing during violent maneuvers reaching 12–15 G levels can cause rapid permanent deformation or fatigue cracks in metal bodies. In contrast, CFRP structures minimize stress accumulation and limit total deformation by primarily transferring the load along the direction of high-modulus fibers [13], [31]. This ensures minimal permanent deformation in the structure even after high-G maneuvers, preserving the platform's long-term structural integrity.

Furthermore, this high rigidity is also necessary for the accuracy of flight control systems. Flight control surfaces such as ailerons and rudders must not flex under the aerodynamic loads acting on them at high speeds. These CFRP-manufactured elements guarantee that pilot or flight computer commands are converted into surface movement in a desired and predictable manner, without delay, thanks to their rigid structure [5], [10]. All these features make CFRP not only a lightweight alternative but also an indispensable technology that offers superior structural reliability and flight performance.

The Use of CFRP in Fuselage, Wing, and UAV Platforms

Studies show that the use of CFRP in modern fighter jets has reached 40–50 percent and that this percentage is increasing, particularly due to reduced radar signature (stealth) requirements [2], [13], [23], [32], [33]. In this increase, not only the structural superiority of CFRPs but also their potential to provide material-structure-function integration plays a decisive role. Particularly in multi-role fighter aircraft (e.g., F-35), a large portion of the fuselage, wing skins, composite fuel tanks, and antenna/pod attachment surfaces are manufactured from CFRP. CFRP structures can be designed with fewer edges and joints compared to traditional metallic structures, thereby minimizing radar reflections (corner reflections). Furthermore, by using matrixes reinforced with specific types of carbon fibers, weaves,

and special nano fillers (carbon nanotubes, graphene, ferrite), the structure itself can be converted into a broadband radar absorber (Radar Absorbing Material - RAM) [4], [7], [16], [34]. This integrated approach directly enhances the platform's survivability by providing stealth performance without increasing weight.

CFRP is an even more strategic and indispensable material for UAV and UCAV platforms. In these platforms, the balance between cost, durability, and performance is critical. The use of CFRP offers the following advantages thanks to its combination of low density and high rigidity:

Increased Flight Time and Range: The reduction in weight means longer airborne time with the same fuel or battery capacity, or the ability to carry a greater mission payload for the same duration [13].

Operational Flexibility: Lower power consumption reduces runway requirements and enables operations from smaller, mobile bases.

Structural Stability and Robustness: Reduced vibration and aeroelastic flutter tendencies increase flight control precision and extend platform life. Furthermore, high corrosion and chemical resistance enable low maintenance requirements in harsh environmental conditions [12], [24].

Rapid Design and Production: Mission-specific modular body components (different sensor pods, wing configurations) can be developed much faster and at lower cost compared to metallic alternatives, thanks to the advantage of composites being molded on a mold [12], [31].

It is known that CFRP body, wing, tail, and landing gear components are extensively used in the Bayraktar TB2, Akıncı, and Anka series, which are platforms of critical importance in Turkey's defense sector [35]. The operational success and durability demonstrated by these platforms are concrete evidence of how maturely and reliably CFRP has been integrated into domestic and national defense systems. The adoption of this technology has given these platforms decisive tactical advantages over their metal competitors, such as longer range, higher altitude capacity, and less logistical burden in the field.

Thermal, Acoustic, and Vibration Behavior

In defense aviation applications, CFRP is important not only for its lightness but also for its thermal stability and vibration management performance. According to the literature, CFRP structures offer significant advantages over metals in these areas as well [18], [26], [29].

Superior Thermal Stability and Low Thermal Expansion: CFRPs are much more stable in terms of thermal expansion compared to metal alloys, particularly due to the ability of carbon fibers to exhibit a negative or near-zero coefficient of thermal expansion (CTE). This property can be optimized by controlling fiber orientations through laminate design. As a result, CFRP structures maintain their dimensional stability in environments ranging from low temperatures at high altitudes to high temperatures encountered during supersonic flight or missile exhaust. This is critical for mounting surfaces of components such as precisely aligned radar antennas, electro-optical/infrared (EO/IR) camera systems, and guidance units; there is no performance loss or misalignment even during temperature fluctuations [18], [26].

High Vibration Absorption Capacity: The natural vibration absorption (damping) capacity of CFRPs is significantly higher than that of traditional metallic structures. This property is explained by the dissipation of mechanical energy into heat at the viscoelastic interface between the fiber and the polymer matrix. As a result, vibrations originating from the engine or aerodynamics are damped more effectively in CFRP structures. This not only extends the structural fatigue life but also improves the operating environment of vibration-sensitive precision avionics and sensor systems, reducing error rates

and increasing measurement accuracy [18], [29].

Electromagnetic Compatibility (EMC) and Interference Protection (EMI) Advantage: CFRP structures, especially when conductive carbon fibers are used, offer a more flexible and advantageous platform in terms of electromagnetic compatibility compared to metal alloys. On the one hand, CFRPs used as structural components can be designed to absorb or scatter radar signals through appropriate layer arrangement and fiber orientation, thereby imparting stealth properties [7], [16]. On the other hand, conductive meshes or special nanofillers (e.g., carbon nanotubes, graphene) that can be integrated into the composite structure can create an effective electromagnetic interference (EMI) shield or Faraday cage for sensitive equipment such as radar antennas or sensor modules. This ensures that critical electronic systems can operate without being affected by signals emitted by each other or external sources [26], [29].

All of these features are considered critical, especially for UAVs operating at high altitude–low temperature missions, missile bodies exposed to thermal shocks, and radar carrier pod systems where the sensitive electronics inside must be protected both mechanically and electromagnetically [26], [29].

Damage Detection, Stress, and Structural Integrity

Maintaining structural integrity and predicting service life are critical in defense platforms. Studies indicate that the most critical challenge for CFRP structures is the development of multiple and complex damage mechanisms, rather than a single crack as seen in traditional metals [18], [22], [23], [40]. These damage mechanisms can be grouped into three main categories:

Matrix-Dominated Damage: Microcracks originating in the polymer matrix, particularly under thermal cycling or low-level fatigue loads.

Interfacial Damage: Separation of the bond between the fiber and the matrix or delamination of laminate layers. This is common in events such as low-velocity impact (LVI) and causes “hidden damage” that may leave minimal surface marks but significantly reduces structural strength.

Fiber Dominant Damage: The breaking of fibers under excessive load, which is generally a more sudden and critical type of damage.

However, with advanced non-destructive testing (NDT) techniques, these damages can be detected at a very early stage, and the structural life can be actively managed. Ultrasonic C-scan is commonly used to map delamination and internal voids, while X-ray Computed Tomography (CT) offers a unique solution for imaging three-dimensional internal structures and micro-damage [22], [40]. Shearography is effective in detecting subsurface defects in large areas by identifying deformation differences under vacuum or thermal loading.

The “damage tolerant design philosophy,” particularly adopted in military platforms, accepts these natural damage mechanisms of CFRP and aims for the structure to continue operating safely up to a certain damage level. This philosophy is successfully implemented in CFRP through proper fiber orientation, multi-axis fabric design, and matrix modifications (e.g., nanofillers or thermoplastic interlayers to increase toughness) [18], [23].

The practical application of this approach involves modeling the growth trend of a delamination detected in a critical component based on detailed finite element analysis and experimental data and safely monitoring it according to the flight-load profile. This allows maintenance and repair activities to be scheduled at the most appropriate time, maximizing the platform's availability rate and preventing unnecessary and premature component replacements. Consequently, advanced NDT

methods and damage-tolerant design principles form the basis for CFRP providing high reliability and a predictable service life in military aviation [22], [40].

The Advantage of CFRP for Stealth (Low Radar Visibility)

One of the most important reasons for the widespread use of CFRP in aviation applications is that its non-metallic structure provides a low radar cross section (RCS). While metal surfaces reflect radar waves at a high rate and coherently due to their electrical conductivity, CFRP surfaces offer important advantages in this regard [7], [16], [26]:

Controllable Dielectric Properties: The dielectric constant of CFRPs can be modified by the type of fiber used (high modulus, high strength), the fiber texture, and the composition of the polymer matrix. This allows the reflection coefficient of the radar signal to be adjusted during the design phase.

Natural Absorption and Scattering: The heterogeneous and layered structure of CFRP absorbs part of the incoming radar energy through internal friction and multiple reflections and scatters the remainder incoherently, thereby reducing backscatter [4], [29].

Advanced Functional Integration: CFRP structures are an ideal platform for directly integrating radar-absorbing material (RAM) layers, frequency-sensitive surfaces (FSS), or conductive nanofillers (carbon nanotubes, graphene) into the laminate structure. This “material-structure-function” integration eliminates the need for separate coatings and the associated weight and maintenance burden [14], [21], [34].

Therefore, platforms such as the F-35 and B-2 Spirit, where stealth capability is fundamental to operational survivability, as well as nearly all modern attack UAVs and new-generation unmanned combat aerial vehicles (UCAVs), are designed with composite-based bodies [13], [16]. CFRP provides these platforms not only with lightness and strength, but also with a multi-spectral low observability capability that integrates reduced radar, infrared, and sometimes acoustic signatures [8], [27]. This makes CFRP not only a structural material for modern and future defense aviation, but also a survivability technology.

The Effects of Production Technologies on Aerospace Structures

The success and performance of CFRP components used in aviation depend largely on the precision and capabilities of advanced manufacturing technologies. The autoclave, Automatic Fiber Placement (AFP)/Automatic Tissue Layup (ATL), and filament winding techniques described in the Materials and Methods section provide distinct advantages in the following critical parameters to meet the stringent requirements of defense aviation [12], [32], [33]:

Superior Layer Integrity and Low Voids Ratio: Autoclave curing under pressure and temperature removes air bubbles and volatiles from the laminate, ensuring a voids ratio below 1%. This guarantees high mechanical performance and long life, which is critical for matrix-dominant properties such as fatigue resistance and compressive strength [12], [33].

Optimized Fiber Orientation in Critical Load Areas: AFP/ATL systems enable the placement of fiber bands in tow form in optimal directions determined by finite element analysis (FEA), even on complex curved surfaces. This enables load-path design, maximizing material utilization and eliminating unnecessary weight [32], [33].

Large-Scale, Single-Piece (Monolithic) Production: These technologies enable the production of large, monolithic components (e.g., full wing box, missile body, helicopter main rotor hub) containing far

fewer parts and fasteners compared to traditional riveted metal structures. This reduces assembly time, increases structural efficiency, and minimizes potential weak points (stress concentration) [32], [33].

High Surface Quality and Aerodynamic Efficiency: Autoclave curing provides components with high mold surface definition and low roughness. This is critically important for aerodynamic efficiency, especially for wing and body outer surfaces that directly affect drag [12], [33].

Stealth-Compatible Surface Roughness and Geometric Accuracy: Controlled manufacturing processes minimize surface irregularities, voids, and edge protrusions that could negatively affect the radar cross-section (RCS). High geometric accuracy and smooth transitions in components produced with AFP prevent unwanted radar reflections (corner reflections) [14], [34].

Lightweight and Rigid Composite Sandwich Structures: These techniques are widely used in the production of sandwich panels that are extremely lightweight and have high bending rigidity by combining CFRP surface layers (skins) with honeycomb, foam, or aramid cores. These structures are ideal for stiffness-critical, low-load applications such as aircraft flooring, rudder surfaces, and radar antenna platforms [12], [14].

Harris' work demonstrates that the industry standard for primary structural components is the autoclave-cured AFP combination and that these technologies have become one of the fundamental parameters determining the performance, range, and stealth characteristics of today's fighter aircraft [32], [33]. Without these advanced manufacturing capabilities, it would not be possible to translate the theoretical advantages of CFRP into such a high degree of reliability in practice.

Ballistic Protection and Armor Systems

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites are currently used for ballistic protection in a wide range of applications, from military personnel protective equipment (chest and side armor plates) to armored vehicle panels, unmanned ground vehicle (UGV) bodies, helicopter floor panels, and seat bases [22]. The main reason CFRP has surpassed traditional materials (steel, aluminum) in this field is its unique specific strength and high specific energy absorption capacity. In addition, its superior rigidity, low density, and controlled damage distribution (laminar delamination, fiber breakage, and matrix cracking) during impact allow kinetic energy to be absorbed and dispersed over a wide area [11], [19], [31].

The reviewed literature shows that CFRP structures are generally used in multi-layer or hybrid armor designs to further increase ballistic resistance. In these designs, CFRP layers are typically placed behind ceramic (alumina, boron carbide) or metal foam layers that break and disperse the bullet in the initial stage of impact. The role of CFRP here is to capture the particles and bullet fragments coming from the ceramic, then dissipate the energy within its own layered structure and limit deformation [11], [17]. Additionally, CFRP layers are often combined with high tensile strength and flexible aramid fiber (Kevlar®) or ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) layers. This combination provides a synergistic advantage by combining the rigidity and energy distribution of CFRP with the high impact resistance and energy absorption of aramid/UHMWPE [19], [22]. Hybrid composite armor designed in this way demonstrates superior performance according to both vehicle armor standards such as NATO STANAG 4569 and personal protection standards such as NIJ (National Institute of Justice), providing effective protection against multiple threats [17].

Despite this superior performance, research continues the optimization of CFRP-based armor. In particular, laminate orientation (ply orientation), fiber-matrix interface properties, and the impact behavior of hybrid composites reinforced with nanofillers (carbon nanotubes, graphene oxide) stand out as critical parameters that could further increase ballistic protection effectiveness [19], [30].

Energy Absorbing Systems

The effectiveness of an armor system is directly related to the dispersion, dissipation, and reduction of penetrating effects of impact energy in the shortest possible time. CFRP layers demonstrate superior performance in fulfilling these three fundamental functions simultaneously, thanks to their high elastic modulus and low density. The kinetic energy of the incoming projectile is rapidly transmitted across the entire surface area of the CFRP laminate, distributing it over a wide area rather than causing localized deformation [11], [19]. This effect critically reduces the depth and area of deformation on the armor's back surface (backface signature), thereby minimizing the risk of serious injury or trauma to personnel behind the armor [22].

Indeed, studies 11 and 19 clearly demonstrate the role of CFRP in multi-layered hybrid systems. These studies show that outer or intermediate layers made of CFRP maintain structural integrity at the moment of impact due to their high stiffness and initiate energy dispersion. This allows materials such as Kevlar, UHMWPE, or ceramics, which are located in the lower layers and have higher toughness, to take on the task of more effectively absorbing the energy dispersed by CFRP and retaining the particles [17].

In multi-layered hybrid designs, CFRP takes on the following complementary functional roles:

Impact-Absorbing Surface Layer: With its high rigidity and hardness, it deforms at the initial point of contact with the bullet or shrapnel, slowing down the penetrating tip massively. It also contributes to multiple impact resistance by maintaining surface integrity [19], [24].

Barrier that Slows and Disperses the Penetrating Tip: Particularly when placed behind ceramic plates, it captures the cloud of hard particles and bullet debris created by the ceramic's fracture, preventing secondary damage and allowing energy to be transferred to the next layer in a more controlled manner [11].

Interlayer Maintaining Post-Impact Structural Stability: While dissipating significant energy through damage mechanisms such as delamination and fiber breakage, it largely preserves the overall shape and framework of the composite panel thanks to its laminate structure. This feature allows the armor to partially maintain its protective capability even after a single impact [22].

Core Material Enhancing Armor Back Surface Stability: By limiting back surface ballooning with high tensile strength, it improves the performance of soft armor materials (aramid, UHMWPE) and reduces final back surface deformation [17], [19].

This layered and functional approach has become standard in various military platforms. Ceramic-CFRP-aramid combinations in military protective vests offer lightness and a high level of protection [31]. In helicopter base plates, CFRP provides multiple impact resistance and structural rigidity [13], while metal-CFRP hybrid laminates are used in armored vehicle side walls to provide protection against high-velocity fragments (EFP/RPG) created by explosive effects [28]. For the ammunition compartment panels of unmanned aerial vehicles (UAVs), CFRP-based composites are preferred for both protection against internal explosions and weight savings.

High-Velocity Impact

As most ballistic threats occur within the 300–1200 m/s velocity range, the high-speed impact behavior of CFRP is of critical importance. This velocity range encompasses bullets from small and medium-caliber infantry rifles, machine guns, and sniper rifles [31]. Study 22 indicates that CFRP

laminates exhibit controlled fracture mechanics even at high speeds against common threats such as 7.62 mm AP and 5.56 mm NATO ammunition, and that fiber orientation (laminate stacking angle) creates performance differences depending on the impact angle. This controlled fracture results from the CFRP laminate dissipating energy through multiple mechanisms (fiber breakage, matrix cracking, interlaminar delamination, and fiber/matrix interface slippage) [11], [19].

Tests conducted on quasi-isotropic configurations, particularly those with fibers oriented perpendicular to the bullet's direction of travel (e.g., 0/90° arrangement), yielded the following results:

A larger portion of the incoming kinetic energy is consumed directly through fiber breakage.

The bullet's velocity and penetration depth decrease significantly faster compared to angular arrangements with lower stiffness,

The crater volume formed in the impact zone and the amount of material scattered backward (backface spall) are lower [11], [22].

However, it has been reported that $\pm 45^\circ$ fiber orientations provide a different advantage. This arrangement allows the laminate to undergo more shear deformation, increasing the amount and area of interlaminar delamination. This extensive delamination absorbs a significant amount of energy and dissipates stresses in the impact zone, which can increase overall ballistic resistance and multiple-hit performance [17], [19].

These findings are of vital importance for specialized armor designs used in the defense industry:

Conical/Curved Armor Panels: On inclined surfaces such as armored vehicle turrets or military truck hoods, the bullet's angle of approach constantly changes. Hybrid laminates, where 0/90° and $\pm 45^\circ$ layups are strategically combined in specific layers, provide optimized, balanced penetration resistance and energy dissipation against these variable angles.

Helicopter Cockpit and Lower Panels: Helicopters are at risk of exposure to fire from below (ground fire). In CFRP panels used in the floor and cockpit base, $\pm 45^\circ$ -weighted layups absorb the energy of shrapnel and bullet fragments through delamination, while 0/90° layers are designed to maintain structural stiffness and penetration resistance [13].

Composite Vehicle Body Panels: For unmanned ground vehicles (UGVs) or light armored personnel carriers, CFRP bodies must be designed to withstand multifaceted threats. Impact simulations and experimental validation indicate that different fiber orientation stack-ups should be used for different regions. For example, hybrid laminates with a 0/90° bias on vertical surfaces and a greater use of $\pm 45^\circ$ layers in corner and joint areas can be preferred to optimize both ballistic protection and structural integrity [11], [22].

In conclusion, the ballistic performance of CFRP is determined not only by material selection but also by the intelligent and application-specific design of fiber orientation. This allows defense engineers to develop highly optimized protection solutions tailored to specific threat scenarios and platform requirements.

The Usage of Carbon Fiber Reinforced Polymer Armor in Military Platforms

CFRP plays a critical role today in many defense platforms, going beyond being a structural component to directly serving as armor or semi-armor (structural armor) [28]. These applications strategically leverage the material's superior specific strength and design flexibility:

Armored Ground Vehicles: In modern armored personnel carriers (APCs) and combat vehicles, composites are replacing traditional steel plates to lower the center of gravity and increase mobility. CFRP/Kevlar hybrid structures have become standard in side panels, turret structures, and especially in blast protection (V-hull) modules. These hybrid laminates offer superior resistance to high-speed deformation and shock loads caused by explosive blasts (IEDs) while significantly reducing weight [22], [28].

Helicopters: In attack/transport helicopters such as the UH-60 Black Hawk, T-129 ATAK, and similar models, critical areas vulnerable to ground fire are protected with CFRP. CFRP layers used in pilot and crew seat panels, underfloor ballistic plates, and fuel cell linings prevent bullet and shrapnel penetration while being much lighter than heavy metal plates, directly improving the helicopter's payload capacity and maneuverability [13], [28].

Unmanned Ground Vehicles (UGV/UGV): Developed for reconnaissance, logistics, or armed combat missions, UGVs must meet the requirements of lightness, silence (low thermal/acoustic signature), and high durability. CFRP armored hulls provide these platforms with a critical weight advantage, enabling longer range and autonomy. They also allow for the production of complex chassis geometries, increasing design optimization [22].

UAV Weapon Hardpoints and Body Compartments: In armed unmanned aerial vehicles, weapon hardpoints and bodies must be designed to withstand both thermal-mechanical loads during firing and potential particle threats. CFRP composites are an ideal material for these demanding conditions due to their fatigue resistance under high cyclic loads and low thermal expansion. Furthermore, they can be shaped to reduce radar cross-section (RCS) [13], [21].

Furthermore, CFRP's electromagnetic permeability (radio frequency transparency) provides a distinct advantage over metallic armor in the modern battlefield. While metal armor can shadow or degrade the performance of communication, navigation, and electronic warfare (EW) antennas on the platform, CFRP structures allow signals to pass through almost freely [21], [16]. This feature enables the use of antennas embedded in the outer surface of an armored vehicle or helicopter (conformal antennas), minimizing communication interruptions and preserving the platform's electronic awareness. Therefore, CFRP has become a fundamental component of future multi-functional defense platforms requiring material-structure-function integration [14], [21].

Stealth Technology & Radar Absorbing Materials (RAM)

In modern defense doctrines, the concept of stealth is not limited to reducing the radar cross section (RCS) but has become a multidisciplinary engineering problem that aims to holistically minimize electromagnetic, infrared (IR), acoustic, and optical detectability. This integrated approach requires managing all signatures to enhance the platform's survivability. In this context, carbon fiber reinforced polymer composites (CFRP) have become one of the cornerstones of stealth technologies in the defense industry, as they can provide both structural load-bearing and electromagnetic wave absorption capabilities, placing them at the center of the “structural absorber” concept [4, 7, 8, 16, 26].

CFRP and the Basic Principles of Radar Invisibility

Radar systems operate based on the reflection of electromagnetic waves from the target surface. While metallic surfaces reflect incoming radar signals to a large extent due to their high electrical conductivity, polymer-based composites offer a significant advantage in this regard. CFRP structures combine the semi-conductive/conductive nature of carbon fibers with the dielectric properties of the polymer matrix, enabling both the absorption and controlled scattering of radar waves [7, 16].

The effectiveness of CFRP in stealth applications is explained in the literature by three main mechanisms: Dielectric Losses: Polarization losses caused by the polymer matrix and special fillers.

Conductivity-Based Joule Losses: Energy dissipation through the conversion of induced currents in the carbon fiber network into heat due to electrical resistance.

Geometric and Structural Scattering: Alteration of wave direction through multi-layered arrangements, specially shaped surfaces (pyramidal, honeycomb), and metastructures.

The combined action of these mechanisms ensures that CFRP-based radar absorber structures (RAS) are effective over wide frequency ranges in critical radar bands such as S, C, X, and Ku [26, 27].

Broadband Radar Absorbing Structures and Metastructures

One of the most critical requirements for modern stealth platforms is broadband absorbers that can neutralize multiple threats (multiple radar bands) in a single structure. This requirement has rendered classic single-layer coatings insufficient and has led to CFRP-based solutions being directed towards multi-layered, functionally graded (gradient-index), and metamaterial designs [4, 14, 21].

Early studies reported by Kangal [4] demonstrated that composite sheets containing carbon fibers provide high absorption at specific frequencies; subsequent studies revealed that these structures can be optimized by adjusting the layer sequence and fiber orientation. Jayalakshmi et al. [7] emphasized that CFRP-based polymer matrix composites can be used simultaneously as both load-bearing and radar-absorbing structures (Radar Absorbing Structure – RAS), thereby saving weight and volume.

In recent years, the concept of metamaterials has led to a significant paradigm shift in CFRP-based stealth designs. Liang et al. [14] and Zhang et al. [21] have demonstrated that CFRP-supported honeycomb, lattice, and gradient-structured metamaterials provide low reflection across very wide bands by trapping incoming electromagnetic waves with specific geometries, creating interference, or damping them with different phase delays. Such smart structures are preferred in the body panels of fifth-generation fighter aircraft, the wing roots of unmanned aerial vehicles (UAVs), and the superstructures of naval platforms.

Emerging Technologies & Nanocomposites

The current success of carbon fiber reinforced polymer composites (CFRP) in the defense industry has led to intensive research into enhancing the functional properties of these materials using nanotechnology-based approaches. In particular, nanomaterial-reinforced CFRP systems offer the potential to meet critical defense requirements—such as electromagnetic wave absorption, thermal management, damage detection, and resistance to multiple threats—within the same structure, while also enhancing mechanical performance [20, 30, 31]. These “smart” or “multifunctional” composites offer revolutionary opportunities to reduce weight, cost, and system complexity in future military platforms.

Nanomaterial-Reinforced CFRP Systems (CNT, Graphene, etc.)

Carbon nanotubes (CNT) and graphene are among the nanomaterials widely used in CFRP matrices and interfaces due to their high electrical/thermal conductivity, large specific surface areas, and

superior mechanical properties [30]. The integration of these nanomaterials into the CFRP structure (by embedding them into the matrix, coating the fiber surface, or placing them at the interlayer) creates a much denser and more homogeneous three-dimensional conductive network compared to conventional carbon fiber-reinforced systems. This network improves absorption performance by increasing the efficiency of electromagnetic energy conversion to Joule heat, while also strengthening the fiber-matrix interfacial bond, thereby enhancing interlaminar shear strength and toughness [26, 30].

Graphene-reinforced CFRP systems are particularly noteworthy for radar absorber structures and multi-scale reinforcement. Controlled dispersion of graphene oxide (GO) or reduced graphene oxide (rGO) layers within the polymer matrix has been reported to provide effective dielectric losses over a wide frequency band [26, 30]. This is due to graphene's high surface area and electron mobility, which increase polarization losses, as well as the synergistic interaction between micro-scale carbon fibers and nano-scale graphene sheets. This hierarchical (multi-scale) architecture allows multiple absorption and scattering mechanisms (dipole polarization, interfacial polarization, conductivity losses) to work simultaneously against the incoming radar wave [29, 30].

CNTs, on the other hand, are particularly prominent in improving mechanical properties and structural health monitoring (SHM). CNT networks integrated into the interfacial layers or matrix of CFRP laminates can function as a distributed damage detection sensor network, operating on the principle of changes in electrical resistance due to microcracks and delamination within the composite [30]. Furthermore, the high thermal conductivity of CNTs and graphene can be used to increase the resistance of CFRP structures to intense thermal loads such as laser radiation; it delays localized burning and perforation by rapidly dissipating heat [25, 30].

These nanocomposite approaches lead to materials specifically designed for defense applications. For example, carbon-based materials developed for radar-infrared compatible stealth aim to combine both broadband radar absorption and low infrared emissivity within the same composite structure [27]. Similarly, nanomaterial-reinforced hybrid composites are also used to increase ballistic impact resistance and electromagnetic shielding (EMI shielding) levels simultaneously [20, 31]. These developments transform CFRP from a passive structural component into an intelligent system that actively contributes to the platform's performance and survivability.

Smart Coatings and Functional Hybrid Structures

In developing defense systems, not only passive protection but also “smart” or “adaptive” material systems that can dynamically respond to environmental conditions and threat types are coming to the fore. In this context, CFRP- based smart coatings enable the development of hybrid structures that can exhibit varying properties in response to electromagnetic, thermal, and mechanical stimuli, thereby increasing the platform's effectiveness in multiple environments [20, 31].

These coatings are typically designed with a multilayer architecture. Czech et al. [31] emphasized that hybrid polymer composites used in defense and weapon systems can be optimized against different threats (ballistic, explosive, thermal, electromagnetic) in a single package by being designed as multilayered, functionally graded, and multiphase structures. In such hybrid systems, CFRP acts as a carrier skeleton, meeting the basic structural load, while functional coatings based on ceramics (heat shield), metallic layers (EMI shielding), or nanomaterials (carbon, ferrite) integrated onto or between the layers provide multiple protection [20].

The most strategic aspect of smart coatings is the ability to dynamically adjust performance. Particular focus is on structures where radar absorption (RAM) performance can be adjusted according to the platform's mission profile or the frequency of the encountered threat. This is made possible by systems combining polymers sensitive to temperature, humidity, electric field, or specific chemicals

(e.g., conductive polymers, shape-memory polymers) with nanomaterials [20, 26]. For example, a matrix whose dielectric constant changes as the ambient temperature increases can optimize the absorption frequency band of a CFRP-based structure against a different radar threat. This adaptive capability allows the platform to offer different stealth levels during different mission phases (infiltration, attack, withdrawal).

Integrated Structural and Electromagnetic Functions

Another revolutionary approach that has emerged in recent years is the design of CFRP not only as a structural material but also as a multifunctional system that naturally incorporates and manages electromagnetic functions. This “material-structure-function” integration provides significant savings in weight and volume. In this approach, CFRP can simultaneously perform tasks such as load carrying, radar absorption/scattering, thermal management, and even structural health monitoring (SHM) through internal sensor networks [14, 21, 34].

Liu et al. [34] demonstrated that CFRP provides an optimal balance between stealth and mechanical performance in integrated structural/electromagnetic wave absorber polymer-based composites developed for aeronautical applications. The study detailed how co-designing fiber orientation, layer sequence, and dielectric properties can be optimized to achieve both high tensile strength and stiffness, as well as broadband high absorption (>90%) in the X and Ku bands.

Such multifunctional structures offer a critical advantage, particularly for next-generation platforms:

5th and 6th Generation Combat Aircraft: Wing and fuselage panels can be manufactured as a single integrated part that both carries aerodynamic loads and absorbs radar signals to reduce RCS [21, 34].

Hypersonic Platforms: In these vehicles operating under extreme aerothermal loads, CFRP-based structures can combine thermal protection systems (TPS) with electromagnetic absorber properties to provide both structural integrity and stealth [27].

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Satellites: On these platforms, where size and weight constraints are most stringent, multifunctional CFRP structures eliminate the need for separate protective or absorptive coatings, increasing valuable payload capacity [13, 14].

This integration also has the potential to reduce life cycle costs by simplifying the platform's production and maintenance processes.

Future Uses and Perspectives

Carbon fiber reinforced polymer composites (CFRP) currently form the structural basis of critical platforms in the defense industry but are poised to take on much more strategic roles in the future in line with evolving threat perceptions and technological transformation. The requirements for low visibility, resistance to multiple threats, high mobility, and system integration that are prominent in new-generation warfare environments necessitate positioning CFRP not only as a structural material but also as a multifunctional defense technology [28, 31]. This evolution points to a paradigm that combines the functions of load bearing, protection, stealth, and even energy management in a single integrated structure.

Use of CFRP in Next-Generation Defense Platforms

Future defense platforms encompass a wide range of operational areas, including manned and unmanned aerial vehicles, hypersonic systems, submarine structures, and land vehicles. The main

reasons for the increased use of

CFRP in these platforms are its high specific strength, corrosion resistance, design flexibility, and natural advantages in reducing radar cross-section [2, 10, 23, 32].

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Swarm Systems: CFRP will continue to be the dominant material for strategic UAVs and swarm drones, which will be at the center of future air operations. While providing low weight, long range, and mission duration, structures reinforced with carbon-based nanocomposites will critically reduce radar and infrared detectability [13, 28]. Moreover, CFRP combined with automation and digital manufacturing techniques (3D printing, automated fiber placement) in the production of these platforms will enable mass production, reducing costs and allowing for the expansion of operational fleets [24].

Hypersonic Platforms and Reusable Systems: Hypersonic vehicles flying at five times the speed of sound and above, and reusable launch systems, are exposed to extreme aerothermal loads (above 1500°C) and structural stresses. CFRPs, used in hybrid configurations with specialized thermal protection systems (TPS) and ceramic matrix composites (CMC), will form the basis for lightweight structures capable of withstanding these harsh conditions. Additionally, the integrated stealth characteristics of these structures will enable hypersonic platforms to be both extremely fast and difficult to detect [13, 27].

Submarines and Naval Platforms: Reducing the magnetic signature is critical for submarines. CFRP's lack of magnetic permeability and corrosion resistance make it the ideal material of the future for submarine hulls, periscopes, and superstructure components. Its lightness also increases stability and fuel efficiency in surface ships by reducing superstructure weight and center of gravity [28]. Furthermore, its low acoustic reflectivity contributes to reducing the acoustic signature.

Next-Generation Land Platforms and Military Infrastructure: Future armored vehicles will require protection not only against ballistic threats but also against electromagnetic warfare (EMW) and directed energy weapons. CFRP-based multi-layered hybrid armor will offer a modular and adaptable protection solution against these multiple threats [22, 31]. Furthermore, the use of CFRP in infrastructure systems such as military bridges, temporary shelters, and mobile command centers will increase installation speed and reduce logistical burden.

The common feature of these platforms is that they adopt CFRP not as a component material, but as a core technology that defines system performance. This necessitates an integrated approach to material development, design, production, and maintenance processes, as well as continuous R&D efforts for the defense industry [13, 28, 31].

Transition to Multi-Functional and Integrated Material Systems

Looking ahead, CFRP is evolving from a single-function structural material into integrated systems that simultaneously perform multiple tasks such as electromagnetic wave absorption, ballistic protection, thermal management, energy storage, and structural health monitoring (SHM). This approach highlights the concept of “material-structure-function integrity” in the defense industry and shifts platform design from an understanding based on adding components to one based on shaping inherently functional materials [21, 34].

At the heart of this transformation lies the use of CFRP as a platform. For example, a wing panel no longer just carries lift; it also monitors structural fatigue with embedded sensor networks, absorbs radar signals with nanofillers, and can facilitate data transmission or energy distribution through integrated conductive pathways [30, 34]. Nanomaterial-reinforced CFRPs are the most important building blocks forming the physical basis of this integration. Systems reinforced with carbon nanotube (CNT) and

graphene networks increase both electromagnetic absorption (Joule losses) and the electrical conductivity of the matrix, making it usable for creating a distributed sensor network [20, 30]. These “smart” composite structures can detect microcracks caused by impact, overload, or fatigue in real time as changes in electrical resistance or impedance, thereby fundamentally improving predictive maintenance and structural safety.

Sustainability, Recycling, and Strategic Independence

The massive increase in the use of CFRP in the defense industry urgently raises sustainability issues such as the management of end-of-life materials, resource efficiency, and environmental footprint. The chemically insoluble structure of traditional thermoset epoxy matrix CFRPs makes recycling an expensive and energy-intensive process (pyrolysis, solvolysis). These challenges are driving the industry towards thermoplastic matrix CFRP systems (PEEK, PEKK, PA) and the development of composites that are designed for recyclability, separability (de-bondable), or reprocessability [24, 40]. Additionally, the mechanical recovery and reuse of carbon fibers has become a vital research area for both economic and environmental sustainability [12].

However, the strategic nature of carbon fiber production (pre-preg, carbonization, graphitization) and advanced composite processing technologies (automated fiber placement, RTM) makes reducing dependence on foreign sources a matter of national security for the defense industry. Developing a domestic and national CFRP production infrastructure (raw materials, machinery, know-how) is critical not only for cost advantages but also for supply chain security, technological autonomy, and flexibility in the serial production of critical platforms [28, 33]. This requires the construction of a comprehensive ecosystem that extends beyond material production to include design software, damage mechanics databases, and advanced production robotics.

Ultimately, the future of CFRP in the defense industry will be determined not by how light or strong it is, but by how smart, integrated, sustainable, and strategically secure it is. Progress on these four axes will position CFRP as the cornerstone of 21st-century defense technologies.

CONCLUSION

This study evaluates the current applications and future potential uses of carbon fiber reinforced polymer composites (CFRP) in the defense industry, based on a comprehensive literature review spanning from the early 2000s to the present. The studies reviewed clearly demonstrate that CFRP has become an indispensable component of modern defense systems, not only due to its classic advantages such as high specific strength and lightness, but also due to its ballistic resistance, electromagnetic wave absorption, low radar cross section, and multifunctional structural properties.

The use of CFRP in aerospace platforms provides weight reduction compared to metal-based materials while increasing structural integrity and fatigue resistance; this results in longer mission durations, higher maneuverability, and increased operational effectiveness. Particularly in manned and unmanned aerial vehicles, CFRP-based structures offer critical advantages in terms of both aerodynamic performance and stealth capability. In the field of ballistic protection, multi-layered CFRP-based armor systems have been shown in the literature to exhibit effective energy dissipation mechanisms under high-speed impact conditions and to provide similar or superior protection at lower weights compared to traditional metal armor.

Radar-absorbing materials and metamaterial-based CFRP systems, evaluated within the scope of invisibility technologies, highlight the importance of designing electromagnetic properties within material-structure integrity. The use of carbon-based additives and nanomaterials has led to significant advances in areas such as broadband radar absorption performance and resistance to multiple threats. However, new-generation CFRP structures developed against laser radiation and directed energy

threats demonstrate that material-based solutions to asymmetric threats encountered in the defense industry are becoming increasingly important.

Looking ahead, the role of CFRP in the defense industry is expected to evolve from single-function structural material to multifunctional, smart, and integrated systems. The development of nanocomposites, smart coatings, and hybrid structures enables the integration of features such as structural health monitoring, electromagnetic control, and ballistic resistance within a single material system. In addition, sustainability and recycling issues have become an integral part of long-term strategic planning, especially for the defense industry.

In summary, the importance of CFRP in the defense industry is not limited to enhancing the performance of existing platforms. These materials are among the fundamental building blocks that shape the design philosophy of future defense technologies, support strategic independence, and enable the development of high value-added systems. This compilation aims to provide a comprehensive reference framework for future research and technological developments in CFRP-based defense applications.

REFERENCES

- [1] National Research Council, *High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites*. Washington, DC, USA: The National Academies Press, 2005.
- [2] C. Soutis, "Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 412, no. 1-2, pp. 171-176, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.msea.2005.08.064.
- [3] C. Soutis, "Fibre reinforced composites in aircraft construction," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 41, no. 2, pp. 143-151, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.paerosci.2005.02.004.
- [4] S. Kangal, "Development of Radar-Absorbing Composite Structures," M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Middle East Technical Univ., Ankara, Turkey, 2013.
- [5] C. Soutis, "Introduction: Engineering requirements for aerospace composite materials," in *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, 1st ed., P. E. Irving and C. Soutis, Eds. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2015, pp. 1-18.
- [6] T. K. Das, P. Ghosh, and N. C. Das, "Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: a review," *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, vol. 2, no. 2, pp. 214-233, Jun. 2019, doi: 10.1007/s42114-018-0072-z.
- [7] C. G. Jayalakshmi, A. Inamdar, A. Anand, and S. Kandasubramanian, "Polymer matrix composites as broadband radar absorbing structures for stealth aircrafts," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 136, no. 14, p. 47241, Apr. 2019, doi: 10.1002/app.47241.
- [8] H. Ahmad, A. Tariq, A. Shehzad, M. S. Faheem, I. H. Gul, and M. Mujahid, "Stealth technology: Methods and composite materials—A review," *Polym. Compos.*, vol. 40, no. 12, pp. 4457-4472, Dec. 2019, doi: 10.1002/pc.25334.
- [9] I. O. Oladele, T. F. Omotosho, and A. J. Adediran, "Polymer-based composites: an indispensable material for present and future applications," *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2020, Art. no. 8834518, Dec. 2020, doi: 10.1155/2020/8834518.
- [10] C. Soutis, "Aerospace engineering requirements in building with composites," in *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, 2nd ed., P. E. Irving and C. Soutis, Eds. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2020, pp. 3-22.
- [11] Y. O. Kacan and F. Elaldi, "Ballistic performance of unidirectionally oriented carbon fiber reinforced composite armor with high-velocity impact," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 39, no. 23-24, pp. 897-909, Dec. 2020, doi: 10.1177/0731684420940524.
- [12] D. K. Rajak, P. H. Wagh, and E. Linul, "Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review," *Polymers*, vol. 13, no. 21, p. 3721, Oct. 2021, doi: 10.3390/polym13213721.
- [13] M. R. M. Asyraf, R. A. Ilyas, S. M. Sapuan, and M. Y. M. Zuhri, "Advanced composite in aerospace applications: opportunities, challenges, and future perspective," in *Advanced Composites in Aerospace Engineering Applications*, Cham, Switzerland: Springer, 2022, pp. 471-498.
- [14] L. Liang, Y. Lin, Y. Huang, and M. Chen, "Broadband stealth composite metastructure with high

- penetration protection," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 163, p. 107217, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.107217.
- [15] D. A. David, V. Naiker, J. M. J. Fatima, T. George, and S. M. Rangappa, "Polymer composites for stealth technology," in *Progress in Polymer Science*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2022, pp. 155-174.
- [16] S. H. Kim, S. Y. Lee, Y. Zhang, S. J. Park, and J. Gu, "Carbon-based radar absorbing materials toward stealth technologies," *Adv. Sci.*, vol. 10, no. 23, p. 2301054, Aug. 2023, doi: 10.1002/adv.202301054.
- [17] Y. O. Kacan and F. Elaldi, "A numerical model for analysis of layer thicknesses on ballistic resistance of a multilayer armor," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 42, no. 7-8, pp. 327-341, Apr. 2023, doi: 10.1177/07316844221132101.
- [18] C. G. Naidu, C. V. V. Ramana, Y. S. Rao, and G. Kalyana, "A concise review on carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) and their mechanical significance including industrial applications," in *Carbon Nanotubes - Redox Synthetic Approaches and Medicinal Applications*, London, UK: IntechOpen, 2023, ch. 5.
- [19] D. Jia, Y. Xu, L. Wang, J. Zhu, and H. Chen, "Study of the ballistic impact behavior of protective multilayer composite armor," *Comput. Model. Eng. Sci.*, vol. 138, no. 2, pp. 1525-1545, 2024, doi: 10.32604/cmes.2023.028534.
- [20] N. Shirke, V. Ghase, and V. Jamdar, "Recent advances in stealth coating," *Polym. Bull.*, vol. 81, no. 3, pp. 2057-2084, Mar. 2024, doi: 10.1007/s00289-023-04839-w.
- [21] Y. Zhang, H. Dong, C. Yu, Z. Wang, and Y. Huang, "Metastructure based broadband structural stealth with material-structure-function integration," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 245, p. 110362, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.compscitech.2023.110362.
- [22] Shubha and B. C. Ray, *Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Ballistic Protection*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024.
- [23] S. J. Lewis, "The use of carbon fibre composites on military aircraft," *Compos. Manuf.*, vol. 5, no. 2, pp. 95-103, 1994, doi: 10.1016/0956-7143(94)90018-3.
- [24] M. Bukvić, S. Milojević, S. Gajević, M. Đorđević, N. Slavković, and Ž. Kanović, "Production technologies and application of polymer composites in engineering: A review," *Polymers*, vol. 17, no. 1, p. 105, Jan. 2025, doi: 10.3390/polym17010105.
- [25] O. Siora, V. Lukashenko, and A. Bernatskyi, "An interdisciplinary study of the effect of laser radiation on carbon fiber-reinforced polymer, in the context of counteracting unmanned aerial vehicles," *Hist. Sci. Stud.*, vol. 7, no. 1, pp. 45-58, Jan. 2025, doi: 10.32782/hss-2025-7-1-5.
- [26] R. Bharti, M. Mursaleen, and A. Dey, "Carbon-based radar-absorbing materials: a comprehensive review of design, properties, and applications," *Radiat. Eff. Defects Solids*, vol. 180, no. 1-2, pp. 1-30, Jan. 2025, doi: 10.1080/10420150.2024.2346645.
- [27] X. Tan *et al.*, "Carbon-based materials for radar-infrared compatible stealth technology," *Chem. Eng. J.*, vol. 499, p. 156062, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.cej.2024.156062.
- [28] M. M. Alzahrani, K. A. Alamry, and M. A. Hussein, "Recent advances of fiber-reinforced polymer composites for defense innovations," *Results Chem.*, vol. 10, p. 101456, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.rechem.2024.101456.
- [29] S. Mishra, A. Dubey, S. Agarwal, S. Kumar, and A. Dixit, "Investigation of microwave and structural properties of carbon veil-based GFRP composite for stealth applications," *Fibers Polym.*, vol. 26, no. 1, pp. 123-135, Jan. 2025, doi: 10.1007/s12221-024-00658-4.
- [30] Y. Luo, Z. Shi, S. Qiao, A. Tong, X. Liao, and B. Wang, "Advances in nanomaterials as exceptional fillers to reinforce carbon fiber-reinforced polymers composites and their emerging applications," *Polym. Compos.*, vol. 46, no. 1, pp. 1-24, Jan. 2025, doi: 10.1002/pc.28110.
- [31] K. Czech *et al.*, "Hybrid polymer composites used in the arms industry: A review," *Materials*, vol. 14, no. 14, p. 3866, 2021, doi: 10.3390/ma14143866.
- [32] C. E. Harris, J. H. Starnes Jr., and M. J. Shuart, "Design and manufacturing of aerospace composite structures, state-of-the-art assessment," *J. Aircr.*, vol. 39, no. 4, pp. 545-560, 2002.
- [33] C. E. Harris, *An Assessment of the State-of-the-Art in the Design and Manufacturing of Large Composite Structures for Aerospace Vehicles*. NASA Langley Research Center, 2001.
- [34] Z. Liu *et al.*, "Optimal preparation and inherent mechanism of advanced integrated structural/electromagnetic wave-absorbing polymer-based composites for aeronautical applications," *Polym. Compos.*, 2025, doi: 10.1002/pc.29285.
- [35] E. Eryıldız ve A. A. Eker, "Savunma sanayinde kullanılan ileri kompozit malzemeler ve uygulama alanları," *International Journal of Engineering Research and Development*, c. 7, s. 4, s. 8, 2015.
- [36] S. J. Park, "Precursors and manufacturing of carbon fibers," in *Carbon Fibers*, Singapore: Springer, 2018, pp. 31-65.

- [37] E. Frank, F. Hermanutz ve M. R. Buchmeiser, "Carbon fibers: Precursors, manufacturing, and properties," *Macromolecular Materials and Engineering*, c. 297, s. 6, ss. 493-501, Haz. 2012.
- [38] N. Yusof ve A. F. Ismail, "Post spinning and pyrolysis processes of polyacrylonitrile (PAN)-based carbon fiber and activated carbon fiber: A review," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, c. 93, ss. 1-13, Oca. 2012.
- [39] H. K. Shin, M. Park, H. Y. Kim ve S. J. Park, "An overview of new oxidation methods for polyacrylonitrile-based carbon fibers," *Carbon Letters*, c. 16, s. 1, ss. 11-19, 2015.
- [40] D. Ozkan, M. S. Gok ve A. C. Karaoglanli, "Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability," *Engineering Design Applications III*, A. Öchsner ve H. Altenbach, Ed., Cham: Springer, 2020, ss. 235-253.
- [41] D. D. Edie ve J. J. McHugh, "High performance carbon fibers," *Carbon Materials for Advanced Technologies*, T. D. Burchell, Ed., Oxford, UK: Pergamon, 1999, ss. 119-138.

A THEORETICAL STUDY ON COMPOSITE FIBER PRODUCTION USING RPET

Ahmet Türkyılmaz^{1*} Hakan TERZİOĞLU^{2**}

Abstract – This study focuses on transforming polyethylene terephthalate (PET) waste—one of the major contributors to environmental pollution—into a valuable resource through advanced recycling techniques. In the project, recycled PET will first be chemically modified via sulfonation using sulfuric acid, after which the obtained intermediate material will be processed into carbon-fiber-like composite fibers through electrospinning. The approach aims to both reduce the ecological impact of plastic waste and propose a more sustainable production route compared to the energy-intensive and expensive methods used in traditional carbon fiber fabrication. The mechanical, thermal, and structural characteristics of the produced fibers will be examined using analytical tools such as FTIR, TGA/DSC, SEM, and XRD. Ultimately, the project is expected to improve the usability of waste PET in engineering applications, support environmental sustainability, and present an innovative pathway for material development. In addition, the resulting fibers are envisioned to provide a domestic and cost-effective alternative for high-tech fields, including defense, automotive, aerospace, and construction industries.

Keywords –Carbon Fiber, Recycled PET, Sulfonation, Composite Fiber, Electrospinning

INTRODUCTION

Polyethylene terephthalate (PET) is one of the main components of global plastic waste accumulation due to its high consumption volume, necessitating advanced recycling strategies to reduce its environmental burden [7], [13], [16]. While converting PET waste into low-value products limits the efficiency of existing recycling processes, transforming this material into high-value-added composite structures is critically important for sustainability. This study theoretically investigates the chemical stabilization of recycled PET with sulfuric acid and its conversion into fiber form via electrospinning, thereby evaluating its potential as an environmentally friendly alternative to the energy-intensive processes used in carbon fiber production [7], [12]. The fact that sulfonation increases thermal stability by suppressing the melting behaviour of PET and that oriented fiber structures can be obtained through electrospinning indicates that the material can develop carbon fiber-like mechanical properties after carbonization. In this context, the study aims to both reduce the environmental impact of plastic waste and offer a new sustainable material approach for engineering applications.

From this point, the main challenge in considering PET as a precursor for carbon fiber is the thermoplastic structure of the material, as it melts at around 260°C. Considering that the carbonization process occurs in the range of 800–1200°C [11], the fact that PET fibers melt and lose their structure before reaching these temperatures poses a significant limitation. Therefore, PET must be chemically stabilized before carbonization. The literature shows that thermochemical modification based on sulfonation, particularly applied to polyethylene and similar thermoplastics, raises the melting point by creating cross-links between polymer chains [4], [5] and forming functional groups in aromatic rings [9]. Applying this function to PET will enable the material to maintain its shape integrity without melting at high temperatures, thereby allowing the carbonization process to occur more stably.

Also, the electrospinning process applied after stabilization enables the PET solution to be drawn under a high electric field and converted into thin, directed fibers [10], [14]. The literature shows that highly oriented fibers obtained by electrospinning exhibit better mechanical performance after carbonization [3], [15]. This directional alignment facilitates the formation of structures, positively affecting the modulus and strength values of the composite fibers obtained. Previous studies have successfully demonstrated the electrospinning of both recycled PET [2] and sulfonated polymers [6],

providing a methodological foundation for this approach.

There is a scientific gap in the literature about the stabilization of recycled PET through sulfonation and the theoretical assessment of subsequent fiber production via electrospinning. A preliminary study exists in which PET is blended with asphaltene and partially carbonized, reporting a tensile strength of ~0.29 GPa, which provides a valuable benchmark for comparison [1]. In addition to addressing the physical and chemical processes involved in the advanced recycling of PET, this study theoretically illustrates the potential for creating an affordable carbon fiber substitute, which helps to promote environmental sustainability. It is anticipated that the results will offer a new framework for the affordable and domestic manufacturing of composite materials for use in the construction, automotive, aerospace, and defense industries. In this regard, the study lays the theoretical groundwork for a novel approach to material development that produces high added value from an engineering and environmental standpoint.

MATERIALS AND METHOD

The fundamental suitability of the method is directly based on the fundamental challenge arising from PET's thermoplastic structure (melting temperature being 260 °C). The literature indicates that standard thermal stabilization (oxidation at 200-300°C in air) used for traditional precursors such as polyacrylonitrile (PAN) will be insufficient because it is below or very close to PET's melting point; the fiber will melt before reaching the high temperatures required for carbonization (>800°C). However, studies in the literature on other thermoplastic polymers (e.g., Polyethylene-PE) have shown that thermochemical methods such as sulfonation can be used to render the fiber non-meltable [4], [5]. The simplified chemical equation for the sulfonation process of PET material with sulfuric acid is given below.



$R-(C_6H_4)-R$: It represents the benzene ring in the PET polymer chain.

H_2SO_4 : Sulfuric acid

$R-(C_6H_4(SO_3H))-R$: It represents a sulfonated benzene ring (with a sulfonic acid group attached).

H_2O : It represents a water produced as a by-product

Accordingly, the method to be applied in this study is to take the theoretical basis of this proven thermochemical approach for PE and adapt it to the structure of PET. Although the literature review revealed limited data on the direct conversion of PET into carbon fiber, a preliminary study exists in which PET is blended with asphaltene, subjected to melt spinning, and partially carbonized [1]. The fibers obtained in this study exhibited a tensile strength of ~0.29 GPa (290 MPa) and a modulus of ~24.9 GPa. This study provides an important basis for achieving the desired higher strength and modulus values. The literature reports that PET [2] and sulfonated polymers [6] have been successfully converted into nanofiber form by electrospinning, and that this method increases fiber orientation, enabling the production of high-strength fibers after carbonization [3], [15]. The flow diagram for developing carbon fiber-like composite fibers from recycled PET material is provided below.

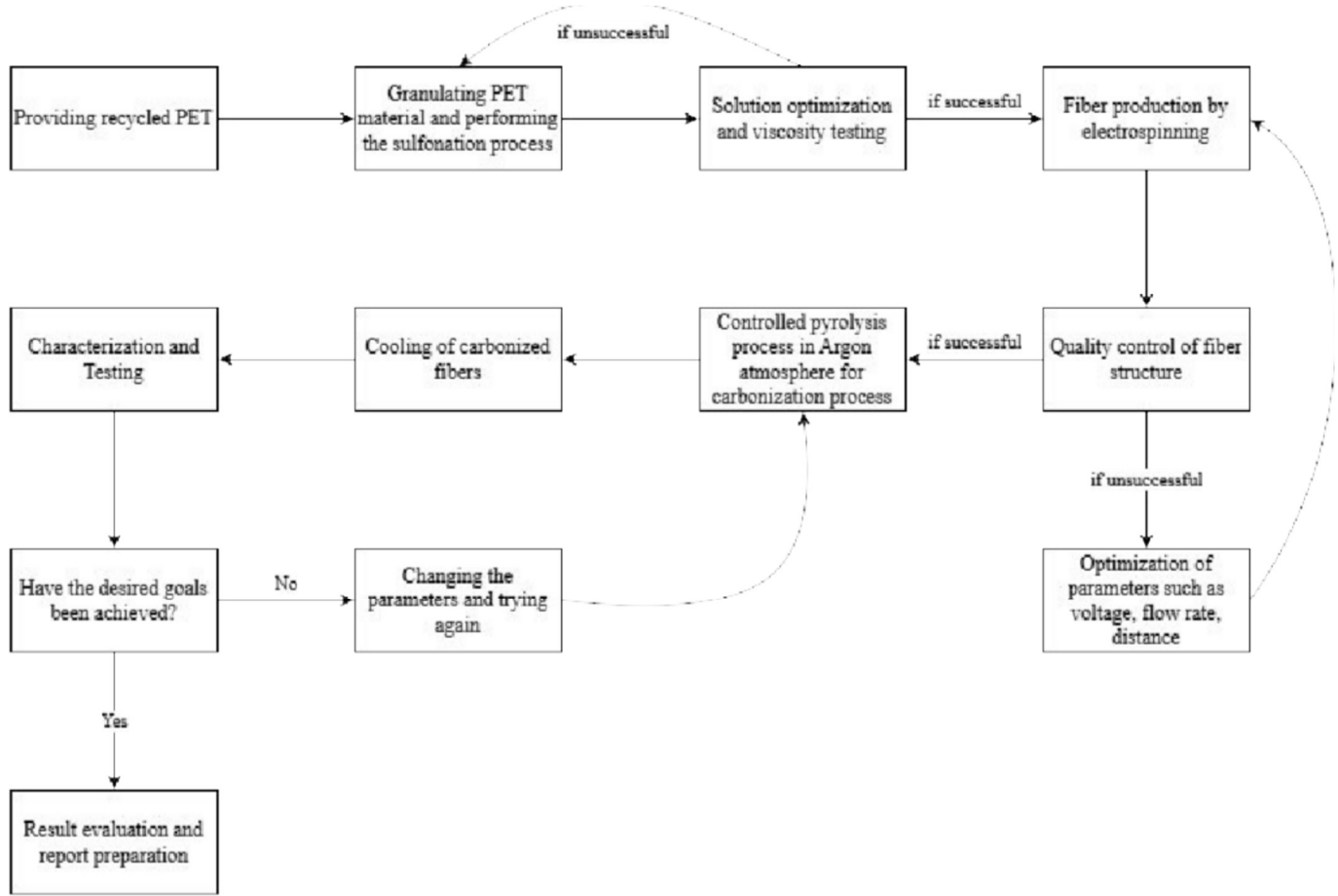


Figure 1. Flow Diagram for developing carbon fiber-like composite fibers from recycled PET material

Research Design and Variables:

1. Independent Variables

Raw Material Purity: The effect of using PET that has undergone chemical depolymerization/repolymerization to remove impurities (e.g., PVC, adhesives) compared to mechanically recycled PET [1], [16].

Stabilization Parameters: Sulfonation reactive concentration, reaction time, and temperature, based on methodologies adapted from polyethylene sulfonation studies [4], [5].

Carbonization Parameters: Final temperature (e.g., range of 800°C-1200°C) and heating rate [11].

2. Dependent Variables

Stabilization Efficiency: Determination of whether the fiber becomes non-meltable and its thermal stability using Thermal Gravimetric Analysis (TGA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC).

Carbon Yield: Percentage of mass remaining after carbonization.

Mechanical Properties: Tensile Strength (MPa) and Elasticity Modulus (GPa) measured using a single fiber tensile testing machine, with comparisons to benchmarks like [1], [3].

Microstructural Properties: Determination of fiber diameter and surface morphology using Scanning Electron Microscopy (SEM); determination of graphitic structure and degree of order using X-ray

Diffraction (XRD) and Raman Spectroscopy, interpreted in the context of carbon fiber literature [8], [11].

Materials to be used during these processes:

Recycled PET (bottle-derived r-PET), granules or fibers
Sulfuric acid (H_2SO_4), concentration: 96–98%

Sodium bicarbonate (NaHCO_3) solution or dilute NaOH for neutralization
Deionized water (pure water) for washing

Solvents (if necessary, ethanol or isopropanol for drying/degreasing)

Magnetic stirrer, ultrasonic mixer, electrospinning system (high-voltage power supply, syringe pump, metal collector)

Inert gas (Ar) for carbonization

Carbonization furnace (with vacuum/flowing inert gas support, 0–1200 °C range)

Equipment for microstructure characterization, mechanical, thermal, and structural analysis: FTIR, TGA/DSC, SEM, XRD, Raman spectrometer, single fiber tensile testing machine, density meter.

The theoretical calculation of the number of plastic bottles required to create a composite sheet measuring 1 m² and 1 mm thick for the research to be conducted is provided below.

The PET bottle used is a standard 0.5 liter (500 ml) bottle. Approximately 20 grams of a bottle is made of PET.

We ignore all losses during the production process (cutting, washing, sulfonation, carbonization) and assume that all 20 grams of PET is carbon fiber. (In reality, the yield may be between 20-50%).

Required Volume = 1 m² x 0.001 m = 0.001 m³ (or 1000 cm³)

The density of pure PET varies between 1.33 and 1.53. We will use the value of 1.38 for our calculations. Carbon fiber density varies between 1.6 and 2.2. We will use the value 1.8 in our calculations.

We can take the density of the composite material (carbon fiber + resin) to be approximately 1.5 g/cm³. Required Mass = Volume x Density

Required Mass = 1000 cm³ x 1.5 g/cm³ = 1500 grams

Total Required PET Mass: 1500 grams (assuming

100% yield) PET in One Bottle: 20 grams

Number of Bottles Required = 1500 grams / 20 grams/bottle = 75 bottles

Assuming 40% efficiency, the number of bottles to be used will be approximately 190.

If a low efficiency of 20% is assumed, the number of PET bottles to be used will be around 375.

RESULTS AND DISCUSSIONS

This research theoretically investigates the development of carbon fiber-like composite fibers from waste PET material. The study evaluates the fundamental suitability of the processes to be employed in practice and the required quantity of material. For instance, calculations indicate that to create a composite sheet measuring approximately 1 square meter in area and 1 mm in thickness, between 180 and 400 0.5-liter PET bottles would need to be processed under realistic conditions. This calculation takes into account the low carbonization yield (20-40%), which is a significant challenge in producing carbon fiber from PET [1, 16].

According to theoretical expectations, the incorporation of sulfonic acid ($-\text{SO}_3\text{H}$) groups into the PET polymer chains through sulfonation will suppress the material's melting behavior and enhance its thermal stability. This aligns with studies demonstrating high stabilization efficiency achieved through sulfonation in other thermoplastic polymers like polyethylene [4, 5]. The subsequent conversion of sulfonated PET (S-PET) into fiber form via electrospinning, which has been successfully reported in the literature for both PET [2] and sulfonated polymers [6], is expected to enable the fibers to acquire a highly oriented morphology. This oriented structure is associated with better mechanical performance in electrospun nanofibers [3, 15].

The mechanical properties of the composite fibers obtained after carbonization could theoretically reach or exceed the performance of fibers produced from PET and asphaltene blends, which have been reported to have a tensile strength of ~ 0.29 GPa [1]. Furthermore, the presence of sulfonic acid groups, whose confirmation is anticipated via FTIR analysis [6, 9], is expected to further enhance the final mechanical performance of the composite material by improving the interfacial adhesion between the fiber and the polymer matrix [8]. In conclusion, this theoretical framework provides an energy-efficient and environmentally friendly roadmap for converting waste PET into high-value-added composite materials.

REFERENCES

- [1] TB. Sarkar, B. Dharmalingam, A. Darbandi, J. C. H. Wong, and M. Trifkovic, "Asphaltene-Recycled Polyethylene Terephthalate (rPET) Blends as Sustainable Carbonaceous Fiber Precursors," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 13, 2025, in press.
- [2] S. S. Gomes, A. M. Oliveira, A. Maia, and M. H. A. Zanin, "Recycled PET Nanofibers Produced by Electrospinning Technique," in *TechConnect Briefs*, 2016, pp. 333–336.
- [3] J. Yao, C. W. M. Bastiaansen, and T. Peijs, "High Strength and High Modulus Electrospun Nanofibers," *Fibers*, vol. 2, no. 2, pp. 158–186, 2014. doi: 10.3390/fib2020158.
- [4] G. Wortberg, A. De Palmaer, M. Beckers, and G. Seide, "Polyethylene-Based Carbon Fibers by the Use of Sulphonation for Stabilization," *Fibers*, vol. 3, no. 3, pp. 373–379, 2015. doi: 10.3390/fib3030373.
- [5] J. H. Eun and J. S. Lee, "Study on Polyethylene-Based Carbon Fibers Obtained by Sulfonation under Hydrostatic Pressure," *Sci. Rep.*, vol. 11, Art. no. 18028, 2021. doi: 10.1038/s41598-021-97506-x.
- [6] M. E. Talukder et al., "Ag Nanoparticles Immobilized Sulfonated Polyethersulfone/Polyethersulfone Electrospun Nanofiber Membrane for Heavy Metal Removal," *Sci. Rep.*, vol. 12, Art. no. 5814, 2022. doi: 10.1038/s41598-022-09824-3.
- [7] S. J. Park and D. G. Lee, "A study on the carbon fibers from polyacrylonitrile precursors," *Carbon*, vol. 43, no. 8, pp. 1778–1787, Jul. 2005, doi: 10.1016/j.carbon.2005.02.021.

- [8] R. J. Young and I. A. Kinloch, "Graphene and carbon-nanotube composite fibers," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 57, no. 6, pp. 1086–1105, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.pmatsci.2012.03.002.
- [9] Y. Wang, J. Li, and S. Li, "Sulfonation of polymers for proton exchange membrane fuel cells," *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, vol. 49, no. 15, pp. 3200–3216, Aug. 2011, doi: 10.1002/pola.24765.
- [10] A. Greiner and J. H. Wendorff, "Electrospinning: A fascinating method for the preparation of ultrathin fibers," *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 46, no. 30, pp. 5670–5703, Jul. 2007, doi: 10.1002/anie.200604646.
- [11] M. Inagaki, *Materials Science and Engineering of Carbon: Fundamentals*, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [12] L. M. Manocha, "Carbon fibers and their composites," *Sadhana*, vol. 28, no. 1, pp. 349–358, Feb. 2003, doi: 10.1007/BF02717143.
- [13] H. A. Maddah, "Polyethylene terephthalate (PET) waste as a building solution," *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 1–9, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.070.
- [14] D. H. Reneker and A. L. Yarin, "Electrospinning jets and polymer nanofibers," *Polymer*, vol. 49, no. 10, pp. 2387–2425, May 2008, doi: 10.1016/j.polymer.2008.02.002.
- [15] S. Zhang, J. Liu, and T. Li, "Mechanical properties of electrospun carbon nanofibers," *Mater. Lett.*, vol. 65, no. 23, pp. 3589–3592, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.matlet.2011.08.028.
- [16] K. H. Lee, "Conversion of PET bottle waste to carbon fiber," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 12, pp. 2620–2624, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.07.015.

YANGINLA MÜCADELEDE YAPAY ZEKA DESTEĞİ: TEORİK VE YAZILIMSAL BİR İNCELEME

Hebatallah Imran Alı ALI

*Department of Computer Engineering, Selcuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya

hebatallah1188@gmail.com

1

Özet – Bu çalışma, yangınla mücadele süreçlerinde yapay zeka teknolojilerinin sunduğu katkıları teorik ve yazılımsal açıdan incelemektedir. Yangınların erken tespiti, risk analizi ve yayılım tahmini büyük veri, görüntü işleme, sensör ağları ve makine öğrenmesi teknikleri ile önemli ölçüde geliştirilebilmektedir. Çalışmada makine öğrenmesi, derin öğrenme (CNN, LSTM), bilgisayarlı görü ve IoT tabanlı sistemlerin yangın yönetimindeki rolü ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Python, TensorFlow, OpenCV ve Scikit-learn kütüphaneleri kullanılarak görüntü sınıflandırma, sensör verisi analizi, risk tahmini ve gerçek zamanlı uyarı sistemlerine ilişkin örnek uygulamalar sunulmuştur. Elde edilen bulgular, yapay zeka modellerinin geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı, hassas ve ölçeklenebilir çözümler sunduğunu göstermektedir. Erken uyarı mekanizmaları can ve mal kayıplarını azaltmakta yayılım tahmin modelleri ise operasyonel kararların daha etkin alınmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte veri kalitesi, gerçek zaman kısıtları ve sistem güvenliği gibi zorluklar yapay zeka uygulamalarının başarısını doğrudan etkilemektedir. Sonuçta, yapay zeka destekli yangın yönetimi hem afet riskini azaltmak hem de müdahale süreçlerini optimize etmek açısından kritik bir yenilik ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda geliştirilecek yeni modeller, sensör teknolojileri ve drone tabanlı sistemler gelecekte yangınla mücadelede önemli fırsatlar sunacaktır.

Anahtar kelimesi –Yapay Zekayla Yangın Tespiti;Yangın Riski Analizi; Erken Uyarı Sistemi; Drone Tabanlı İzleme;Yangın Yönetimi

GİRİŞ

Yangınlar, hem doğal çevre hem de insan yaşamı üzerinde ciddi etkileri olan afetler arasında yer almaktadır. İklim değişikliği, artan sıcaklıklar, hızlı kentleşme ve insan kaynaklı hatalar nedeniyle yangınların sıklığı ve etki alanı her geçen yıl artmaktadır [1]. Geleneksel yöntemlerle yangın tespiti; insan gözetimi, kamera sistemleri veya basit sensörlerden elde edilen verilerle sınırlı kalmakta, bu nedenle erken uyarı ve hızlı müdahale süreçlerinde yetersizlikler ortaya çıkmaktadır [6]. Bu durum, yangınların büyümesine, kontrol edilmesinin zorlaşmasına ve hem çevresel hem de ekonomik kayıpların artmasına yol açmaktadır.

Bu noktada yapay zeka (YZ) teknolojileri, yangınla mücadelede yeni ve güçlü bir yaklaşım sunmaktadır. Büyük veri analitiği, görüntü işleme, makine öğrenmesi, derin öğrenme ve IoT tabanlı sensör ağları sayesinde yangınların erken evrede tespit edilmesi, risk düzeylerinin belirlenmesi ve yayılım modellerinin tahmin edilmesi mümkün hale gelmiştir [2], [3]. YZ modelleri; uydu görüntüleri, kamera kayıtları, sensör verileri ve meteorolojik bilgiler gibi çok kaynaklı verileri işleyerek karar vericilere gerçek zamanlı bilgi sağlamaktadır [4].

Yapay zeka yalnızca yangının tespit edilmesine katkı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda itfaiye ekiplerinin yönlendirilmesi, kaynak optimizasyonu, tahliye planlaması ve müdahale stratejilerinin geliştirilmesi gibi süreçlerde de önemli bir rol oynamaktadır [5]. Bu sayede yangın yönetimi, reaktif bir yapıdan proaktif bir yapıya dönüşmekte; riskler önceden tahmin edilerek daha etkili bir mücadele imkanı sağlanmaktadır. Bu çalışma, yangınla mücadelede yapay zeka teknolojilerinin sunduğu teorik altyapıyı ve yazılımsal uygulamaları inceleyerek, bu alandaki güncel yöntemleri ortaya koymayı amaçlamaktadır. Ayrıca erken tespit, risk analizi, yayılım tahmini ve gerçek zamanlı uyarı sistemleri gibi kritik bileşenlerin yapay zeka ile nasıl geliştirilebileceğini ele alınmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Yangınla mücadelede yapay zeka tabanlı sistemlerin geliştirilmesinde kullanılan materyaller ve yöntemler, büyük veri kaynakları, sensör ağları, görüntü verileri ve çeşitli makine öğrenmesi modelleri üzerine yapılandırılmıştır. Bu bölümde, yangın tespiti, risk analizi ve yayılım modellemesinde temel alınan teorik ve yazılımsal altyapı açıklanmaktadır.

Kullanılan Materyaller (Teorik Yapı)

Sensör Tabanlı Veri Kaynakları: Yangın tespitinde sıcaklık, nem, karbonmonoksit, duman yoğunluğu ve gaz sensörleri gibi IoT tabanlı sistemler önemli bir materyal bileşenidir. Sensör ağları, ortamda meydana gelen ani değişimleri algılayarak yangın başlangıcı hakkında veri üretir [1], [2].

Bu veriler, zaman serisi yapısında analiz edilmekte ve yapay zeka modelleri için temel girdileri oluşturmaktadır.

Görüntü ve Uydu Verileri: Görüntü tabanlı materyaller arasında CCTV kameralar, termal kameralar, dron görüntüleri ve uydu verileri yer almaktadır. Bu veriler yangının varlığını, yayılım yönünü ve yanma yoğunluğunu tespit etmek için bilgisayarlı görü çözümlerine uygun yapıdadır [3], [6].

Uydu görüntüleri özellikle geniş alanlarda sıcaklık anomalisi tespiti için kullanılmaktadır.

Coğrafi ve Meteorolojik Veriler: Yangın riskinin belirlenmesinde sıcaklık, nem, rüzgar hızı, yağış ve topografya bilgisi önemli materyal girdileridir [1]. Bu veriler yangın olasılığı modellerinin teorik temelini oluşturur.

Kullanılan Yöntemler (Teorik Yaklaşımlar)

Makine Öğrenmesi Yöntemleri: Makine öğrenmesi modelleri, sensör ve meteorolojik verilerdeki örüntüleri analiz ederek yangın olasılığını tahmin etmek için kullanılan teorik yöntemlerdir.

Bu modeller arasında:

- Rastgele Orman
- Destek Vektör Makineleri
- Gradient Boosting

gibi algoritmalar yer almakta olup yangın riski tahmininde sıkça kullanılmaktadır [1], [2], [3].

Derin Öğrenme Yöntemleri: Görüntü tabanlı yangın ve duman tespiti için Evrişimsel Sinir Ağları (CNN) yaygın bir yöntemdir [6].

Zaman serisi verilerinin analizinde LSTM gibi derin öğrenme modelleri, sıcaklık ve nem değişimlerini değerlendirerek olası yayılım eğilimlerini tahmin edebilir [4].

Bilgisayarlı Görü Yaklaşımları: Görüntü işleme teknikleri, yangın tespitinin önemli bir yöntem grubunu oluşturur. Teorik süreçte kullanılan yöntemler şunlardır:

- Duman ve alev morfolojisinin analizi
- Piksel temelli renk-sıcaklık ilişkisi çıkarımı
- Derin ağlar (CNN) ile görüntü sınıflandırma
- Uydu görüntülerinde sıcaklık anomalisi tespiti [3], [6]

Bu yöntemler, geniş alanların otomatik ve hızlı şekilde taranmasını sağlar.

Yangın Yayılım Modelleme Yöntemleri: Yangınların zamansal ve mekansal yayılımını modellemek için teorik yöntemler kullanılmaktadır.

Bu yöntemler:

- Topografya, rüzgar ve yakıt yüküne dayalı istatistiksel modeller
- Veri odaklı derin öğrenme yayılım modelleri
- Hücresel otomata tabanlı geçiş olasılık sistemleri olarak sınıflandırılabilir [1], [4].

Karar Destek ve Optimizasyon Yöntemleri: Yangınla mücadelede kaynak tahsisi, ekip yönlendirme ve tahliye planlamasında optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır.

Bu teorik yöntemler:

- Takviyeli öğrenme ile rota planlama [5]
- Çok amaçlı optimizasyon algoritmaları
- Risk puanlarına dayalı dinamik müdahale stratejileri şeklinde sıralanabilir [5].

Teorik Model Akışı

Yangınla mücadelede yapay zeka tabanlı sistemlerin genel yöntem akışı şu şekilde yapılandırılmıştır:

1. Veri Toplama: Sensör verisi, kamera görüntüsü, meteorolojik veri [1], [2]
2. Veri Ön İşleme: Gürültü temizleme, normalizasyon, görüntü iyileştirme işlemleri [3] 3.
4. Özellik Çıkarımı: Görüntüde duman/alev özellikleri, sensör verilerinde anomali tespiti [6]
5. Modelleme: Makine öğrenmesi veya derin öğrenme algoritmalarının kullanılması [4]
6. Tahmin / Sınıflandırma: Yangın var/yok, risk düzeyi, yayılım tahmini
7. Karar Destek: Uyarı üretimi, kaynak yönlendirme [5]

Bu akış, literatürde yaygın olarak kullanılan yapay zeka destekli yangın yönetim modelleriyle uyumludur.

Teorik Yaklaşımların Değerlendirilmesi

Teorik materyal ve yöntemlerin genel amacı, yangını mümkün olan en erken aşamada tespit etmek, yayılımını tahmin etmek ve müdahale süreçlerini optimize etmektir.

Literatürde sunulan yöntemler:

- Büyük veri analitiğinin etkili kullanımı [1]
- Görüntü tabanlı tespitin güvenilirliği [6]
- Meteorolojik verilerin risk tahminine katkısı [1], [3]
- Derin öğrenme modellerinin yüksek başarı oranları [4] gibi önemli bulgular ortaya koymaktadır.

Yazılımsal Yaklaşımların Teorik Açıklaması

Veri İşleme Sürecinin Teorik Yapısı: Yangınla mücadelede kullanılan yapay zeka modelleri, sensör, meteorolojik ve görüntü verilerinin düzenli ve anlamlı bir yapıya dönüştürülmesini gerektirir. Veri işleme süreci; eksik değerlerin belirlenmesi, verilerin belirli ölçeklere uyarlanması ve görüntülerin model tarafından işlenebilir biçime getirilmesi gibi adımlar içerir. Bu süreç, veri bütünlüğünün sağlanması ve modellerin tutarlı örüntüler öğrenebilmesi açısından temel bir bileşendir [1], [2].

Görüntü İşleme ve CNN Tabanlı Yangın Tespitinin Teorik Temeli: Görüntü tabanlı yangın tespitinde Evrişimsel Sinir Ağları (CNN), görüntülerdeki duman ve alev gibi görsel örüntüleri tanımlamak için kullanılan derin öğrenme yaklaşımıdır. CNN mimarisi, görüntülerden kenar, şekil ve renk gibi özellikleri otomatik olarak çıkaran evrişim katmanları ile çalışır. Bu özellikler daha sonra sınıflandırma katmanlarında değerlendirilerek görüntünün yangın içerip içermediğine ilişkin kavramsal sonuç üretilmesini sağlar [6].

Makine Öğrenmesi Yaklaşımlarıyla Yangın Riski Analizi: Meteorolojik veriler kullanılarak yangın olasılığının değerlendirilmesinde makine öğrenmesi modelleri önemli bir yöntemdir. Rastgele Orman (Random Forest) gibi algoritmalar, sıcaklık, nem ve rüzgar gibi değişkenler arasındaki ilişkileri inceleyerek risk seviyelerinin belirlenmesinde istatistiksel bir karar mekanizması sunar. Model, çok sayıda

karar ağacının birleşik değerlendirmesine dayalı olarak veri içindeki örüntüleri analiz eder ve risk sınıflarını belirlemeye yönelik teorik bir yaklaşım oluşturur [1], [3].

LSTM Yapısı ile Yangın Yayılım Eğiliminin Teorik İncelenmesi: Yangınların zaman içindeki davranışını incelemek için LSTM (Long Short-Term Memory) gibi zaman serisi modelleri kullanılır. LSTM yapısı, geçmiş veri adımları arasındaki bağımlılıkları inceleyerek sıcaklık, nem veya rüzgar değişimlerinin ileriki zamanlarda nasıl bir etki oluşturabileceğini teorik olarak değerlendirmeyi mümkün kılar. Bu yönüyle LSTM, yangın yayılım hızının ve yönünün öngörülmesinde kullanılan önemli bir derin öğrenme yaklaşımıdır [4].

IoT Tabanlı Gerçek Zamanlı Uyarı Sistemlerinin Teorik Yapısı: Yangın erken uyarı sistemlerinde kullanılan IoT tabanlı sensör ağları, ortam koşullarını sürekli takip eden bir izleme altyapısı sunar. Sensörler tarafından algılanan sıcaklık, duman veya gaz değişimleri belirli eşik değerleriyle karşılaştırılabilir. Bu yapı, ortamda olağan dışı bir artış görüldüğünde uyarı üretmeyi amaçlayan teorik bir karar mekanizmasının temelini oluşturur. Bu yaklaşım, modern yangın izleme sistemlerinin en önemli bileşenlerinden biridir [2], [5].

Model Performansını Değerlendirmeye Yönelik Teorik Metrikler: Yapay zeka modellerinin başarısını anlamak için doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1 skoru gibi performans ölçütleri kullanılır. Bu metrikler, modelin yangın tespiti veya risk analizi sırasında ne kadar güvenilir çıktılar ürettiğini değerlendirmek için teorik çerçeve sunar. Ayrıca farklı modeller arasında karşılaştırma yapmayı mümkün kılarak hangi yöntemlerin daha etkili olduğunu belirlemeye yardımcı olur [1].

Sistemin Blok Şeması, Akış Diyagramı ve Algoritmik Yapısının Teorik Açıklaması

Sistem Blok Şeması (Teorik Açıklama): Yangınla mücadelede kullanılan yapay zeka tabanlı sistemler genellikle çok katmanlı bir mimariyi temel alır. Blok şema, bu mimarinin temel bileşenlerini ve bileşenler arasındaki veri akışını kavramsal düzeyde gösterir.

Bu yapı çoğu zaman:

1. Veri Toplama Katmanı (sensörler, kameralar, uydu verileri)
2. Ön İşleme Katmanı (gürültü azaltma, normalizasyon)
3. Modelleme Katmanı (makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri [1], [6])
4. Karar Destek Katmanı (risk değerlendirme, uyarı mekanizması [5])

bileşenlerinden oluşur. Blok şema, sistemin genel işleyişinin yüksek seviyeli bir görünümünü sunar.

Akış Diyagramı (Teorik Açıklama): Akış diyagramı, sistem içinde gerçekleşen işlemlerin sırasını ve bu işlemler arasındaki karar noktalarını gösteren grafiksel bir gösterimdir. Yangın tespitine yönelik tipik bir akış diyagramı, aşağıdaki kavramsal adımları içerir:

1. Verinin okunması (sensör veya görüntü kaynaklı bilgi)
2. Verinin değerlendirilmesi (anormallik kontrolü, özellik çıkarımı [6])
3. Model tarafından analiz edilmesi (CNN, Random Forest, LSTM gibi yöntemlerle değerlendirme [1], [4])
4. Karar aşaması (yangın olasılığı belirlenen eşiği aşarsa uyarı)
5. Çıkış (alarm, bildirim veya risk sınıflandırması)

Bu yapı, sistemin birbirini takip eden işlemler üzerinden nasıl mantıksal bir karar ürettiğini teorik olarak açıklar.

Algoritma Yapısının Teorik Açıklaması: Algoritma, sistemde izlenen işlem adımlarının soyut ve düzenli bir tanımıdır. Yangın tespiti ve risk analizi algoritmaları, hem veri işleme hem de model değerlendirme aşamalarını kapsayan ardışık mantıksal süreçlere dayanır.

Bu algoritmalar genellikle:

- Girdi verisinin analizi,
- Özellik çıkarımı veya anomali tespiti,
- Modelin değerlendirme yapması,
- Belirli eşik değerlerine göre karar verilmesi,
- Çıktı üretimi

şeklinde ilerler.

Yapay zeka tabanlı yangın algoritmaları, veri yoğun ortamlarda hızlı karar verebilmek üzere tasarlanmış olup; zaman serisi analizi, görüntü işleme ve sınıflandırma yöntemleriyle desteklenmektedir [1], [4], [6].

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Yapay zeka teknolojilerinin yangınla mücadele alanında kullanımı, hem erken tespit hem de karar destek mekanizmaları açısından önemli bir dönüşüm oluşturmaktadır. Çalışmada sunulan teorik incelemeler, makine öğrenmesi, derin öğrenme, IoT tabanlı sensör ağları ve bilgisayarlı görüş yöntemlerinin yangın tespitini hızlandırdığını, yayılımın tahmin edilmesine katkı sağladığını ve müdahale stratejilerinin daha verimli şekilde planlanmasına imkan tanıdığını göstermektedir. Bu yöntemler sayesinde, geleneksel gözlem temelli yaklaşımlara kıyasla daha hızlı reaksiyon verme, geniş alanları aynı anda izleme ve çok kaynaklı veri üzerinden yüksek doğrulukta analiz yapabilme olanakları ortaya çıkmaktadır.

Tartışma kapsamında, yapay zeka tabanlı sistemlerin özellikle sensör verileri, uydu görüntüleri ve kamera kayıtlarının bütünleşik olarak analiz edilmesinde büyük potansiyel taşıdığı görülmektedir. Bununla birlikte, veri kalitesi, hesaplama maliyeti, gerçek zaman gereksinimi ve modellerin açıklanabilirliği gibi çeşitli zorluklar uygulama sürecinde öne çıkmaktadır. Çalışmanın genel değerlendirmesine göre, bu teknolojilerin sahada etkin biçimde kullanılabilmesi için hem teknik altyapının güçlendirilmesi hem de algoritmaların daha güvenilir, hızlı ve ölçeklenebilir hale getirilmesi gerekmektedir.

Gelecek çalışmalar incelendiğinde, derin öğrenme tabanlı hibrit yayılım modelleri, drone destekli izleme sistemleri, geniş ölçekli IoT sensör ağları, bulut bilişim ve dijital ikiz uygulamalarının yangınla mücadele alanında önemli geliştirme fırsatları sunduğu görülmektedir. Özellikle dronlar ve uydu tabanlı görüntüleme teknolojileriyle yapay zekanın entegrasyonu, gerçek zamanlı ve yüksek doğrulukta yangın haritalarının oluşturulmasını sağlayacaktır. Benzer şekilde, kenar bilişim (Edge AI) çözümleri, verilerin sahada işlenmesine imkan tanıyarak gecikmeleri azaltacak ve erken uyarı sistemlerinin daha güvenilir hale gelmesine katkıda bulunacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma yangınla mücadelede yapay zeka yöntemlerinin hem mevcut durum hem de geleceğe yönelik gelişme potansiyeli açısından kritik bir role sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Yapay zekanın hızlı, ölçeklenebilir ve çok kaynaklı veri işleme yeteneği, afet yönetiminin geleceğini şekillendiren temel unsurlardan biri haline gelmiştir. Disiplinler arası iş birlikleri ve teknolojik yenilikler ile birlikte, yapay zeka destekli yangın yönetim sistemlerinin daha güvenli, daha hızlı ve daha etkin stratejiler sunması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] P. Jain, S. C. P. Coogan, S. G. Subramanian, M. Crowley, S. Taylor, and M. D. Flannigan, "A review of machine learning applications in wildfire science and management," *Environmental Reviews*, vol. 28, no. 4, pp. 478–505, 2020. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0019>

- [2] G. Chirici et al., “Integrating remote sensing, GIS and forest fire models for fire danger mapping,” *iForest – Biogeosciences and Forestry*, vol. 6, no. 1, pp. 14–22, 2013. <https://doi.org/10.3832/ifor0662-006>
- [3] C. Filizzola et al., “RST-FIRES: An exportable algorithm for early-fire detection and near-real-time monitoring from space,” *Remote Sensing*, vol. 9, no. 8, p. 827, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9080827>
- [4] J. A. Molina-Padron, J. Ramos, and M. Villalobos, “Deep learning for wildfire detection and segmentation in aerial imagery,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP)*, 2019, pp. 224–229. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2019.8803730>
- [5] K. P. Valavanis and G. J. Vachtsevanos, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>
- [6] S. Yoon and M. Golparvar-Fard, “Fire and smoke detection in videos for early fire-alarm using deep learning,” *Automation in Construction*, vol. 53, pp. 27–38, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.003>

LYAPUNOV TABANLI UYARLAMALI DENETİMLERDE KARARLILIK GARANTİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Yasin ULUS

Özet – Bu metin; uyarlamalı denetimin (adaptive control) geçici rejimdeki (transient) salınım/sapma sorunlarını merkeze alarak, Lyapunov temelli kararlılık çerçevesinde dört ana yaklaşımı karşılaştırmalı biçimde inceleyen bir literatür ve yöntem özetidir. Giriş bölümünde, Lyapunov yeniden tasarımının asimptotik izlemeyi garanti edebilmesine rağmen, pratikte geçici davranışın büyük salınımlar gösterebildiği; bu nedenle kontrol mimarisi ve adaptasyon yasalarının transient performansı iyileştirecek şekilde geliştirildiği vurgulanır. Çalışmanın ana amacı, MRAC, L1-Adaptive Control, Gain Scheduling ve Model-Free Adaptive Control (MFAC) yöntemlerinin kontrol yasalarını ve adaptasyon mekanizmalarını Lyapunov teorisiyle analiz ederek kararlılık koşullarını, hata dinamiklerini ve parametre yakınsamalarını ortaya koymaktır.

Literatür taraması kısmında, özellikle robotik/İHA/USV gibi belirsizlik ve bozucuların yoğun olduğu uygulamalarda L1 ve MRAC türevlerinin; gözlemci entegrasyonu, düşük geçiren filtreleme, bariyer Lyapunov fonksiyonları, anahtarlama sistemler için dwell-time ve veri-bilgiselliği (data-informativity) gibi kavramlarla geliştirildiği gösterilir. Gain-scheduling’in farklı çalışma noktalarında yerel lineer denetleyicilerle pratik çözüm sunduğu ancak geçişlerde süresizlik/kararsızlık riski taşıdığı; MFAC’ın ise sistem modeli gerektirmeden giriş-çıkış verisiyle kontrol ürettiği fakat gürültüye duyarlılık ve teorik garantilerin çoğu zaman lokal kalması gibi sınırlara sahip olduğu belirtilir.

Yöntem bölümünde; MRAC’ın izleme hatasına dayalı adaptasyonla güçlü teorik garantiler sağladığı ancak gürültü ve agresif adaptasyon altında kontrol sinyali dalgalanması üretebildiği; L1’in hızlı adaptasyon-sağlamlık ayırımı düşük geçiren filtreyle kurarak daha “yumuşak” ve sınırları tasarlanabilir (designable bounds) bir performans sunduğu; gain-scheduling’in global kararlılık için ortak/parametreye bağlı Lyapunov veya switched-systems araçlarına ihtiyaç duyduğu; MFAC’ın ise model bilinmezliğinde avantajlı olmakla birlikte küçük kontrol artırımlarında ve ölçüm gürültüsünde kararsızlığa yaklaşabildiği özetlenir. Sonuç ve tartışma kısmı, yöntem seçiminde belirsizlik düzeyi, gürültü, zaman gecikmesi, doğrusal/ doğrusal olmayan yapı ve veri zenginliği (PE) gibi etkenlerin belirleyici olduğunu; gelecekte veri odaklı L1, derin öğrenme destekli MFAC, daha sağlam MRAC türevleri ve gecikmeye dayanıklı L1 tasarımlarının önemli araştırma yönleri olduğunu vurgular.

Anahtar Kelime – Uyarlamalı denetim, Lyapunov kararlılığı; MRAC; L1-adaptif kontrol; kazanç planlama; modelsiz adaptif kontrol (MFAC)

GİRİŞ

Uyarlamalı sistemlerin asimptotik davranışı son birkaç on yıldır iyi araştırılmıştır ve asimptotik izlemenin Lyapunov yeniden tasarım yöntemi kullanılarak her zaman gerçekleştirilebileceği iyi bilinmektedir. Ancak, giriş ve çıkış sinyallerinin geçici davranışı büyük sapmalarla oldukça salınımlı olabilir (Zang and Bitmead 1990). İzleme hatasının geçici davranışını iyileştirme perspektifinden kontrol mimarisini ve uyarlamalı yasaları değiştirmek için büyük çabalar sarf edilmiştir (Cao and Hovakimyan 2008). Bu çabaların çoğu, yüksek kazançlı doğrusal uyumsuz geri beslemeye anahtarlama kontrol yasasına veya parametreye bağlı kalıcı bir uyarma koşuluna yol açmıştır (Datta and Ioannou 2002). Günümüzde kontrol sistemlerinin tasarımında en önemli hedeflerden biri, sistem parametrelerindeki belirsizliklere ve dış bozucu etkilere rağmen kararlılığın ve performansın korunabilmesidir. Klasik kontrol yöntemleri çoğu zaman sistem parametrelerinin tam olarak bilinmesini varsayar; ancak pratikte modelleme hataları, parametre değişimleri ve ölçüm gürültüleri bu varsayımı geçersiz kılar. Bu nedenle, uyarlamalı denetim (adaptive control) yaklaşımları, sistemin çevresel koşullara veya kendi dinamik değişimlerine göre kendini yeniden ayarlayabilmesi açısından önemli bir çözüm alanı oluşturmuştur (Datta and Ho 1994). Uyarlamalı denetim yöntemlerinin temelinde, sistem parametrelerinin çevrimiçi olarak tahmin edilmesi ve bu tahminlerin kontrol

yasasına dahil edilmesi fikri yer alır. Bu bağlamda, Lyapunov kararlılık teorisi, uyarlamalı algoritmaların matematiksel olarak kararlı olup olmadığını kanıtlamak için en yaygın kullanılan yöntemdir. Lyapunov fonksiyonları sayesinde sistemin hata dinamiklerinin zamana bağlı davranışı incelenir ve belirli koşullar altında sistemin kararlılığı, hatta asimptotik hata sıfırlaması garanti edilebilir(Arteaga and Tang 2002).

Bu çalışma, dört farklı uyarlamalı denetim yönteminin Model Reference Adaptive Control (MRAC), L1- Adaptive Control, Gain-Scheduling Control ve Model-Free Adaptive Control (MFAC) Lyapunov temelli kararlılık analizlerini karşılaştırmalı olarak incelemeyi amaçlamaktadır. MRAC yöntemi, referans model üzerinden sistem performansını yönlendiren klasik bir uyarlamalı kontrol stratejisidir. L1-Adaptive Control, hızlı parametre uyarlaması ile birlikte kontrol sinyali dalgalanmalarını bastırmayı hedefleyen modern bir yaklaşımdır. Gain- Scheduling yöntemi, çalışma noktalarına göre farklı kontrol kazançlarının uygulanmasıyla doğrusal olmayan sistemlerde etkin bir çözüm sağlar. Model-Free Adaptive Control ise, sistem modelinin açıkça bilinmediği durumlarda veri odaklı bir kontrol çerçevesi sunar.

Çalışma kapsamında, her bir yöntemin kontrol yasası ve adaptasyon mekanizması Lyapunov teorisi çerçevesinde analiz edilmekte; kararlılık koşulları, parametre yakınsama özellikleri ve hata dinamikleri matematiksel olarak incelenmektedir. Ayrıca, her yöntemin avantajları ve sınırlılıkları sayısal simülasyon sonuçlarıyla desteklenerek karşılaştırmalı bir değerlendirme sunulacaktır. Bu analizlerin sonucunda, farklı sistem tipleri ve belirsizlik düzeyleri için hangi uyarlamalı denetim yaklaşımının daha uygun olduğu tartışılacaktır.

LİTERATÜR TARAMASI

Uyarlamalı denetim, sistem parametrelerinin zamanla değiştiği veya tam olarak bilinmediği durumlarda kararlılığı ve performansı korumayı amaçlayan bir kontrol yaklaşımıdır(Fu 1992). Bu alandaki araştırmalar 1950'li yıllardan itibaren başlamış olup, zamanla Lyapunov temelli analiz yöntemleriyle teorik olarak güçlü bir yapıya kavuşmuştur. Literatürde dört temel uyarlamalı denetim paradigması öne çıkmaktadır: Model Reference Adaptive Control (MRAC), L1-Adaptive Control, Gain-Scheduling Control ve Model-Free Adaptive Control (MFAC).

Robotik uygulamalar için uyarlanabilir denetleyiciler tasarlanırken karşılaşılan temel zorluklardan biri, sistem durumlarını ölçme ve robotun fiziksel kısıtlamalarına saygı gösterme yetersizliğidir. Bu sorunu ele almak için, bu makalede, denetleyiciyi uyarlanabilir yüksek kazançlı gözlemciler ve Bariyer Lyapunov Fonksiyonu ile entegre ederek değiştirilmiş bir uyarlanabilir denetleyici önerilmektedir. Sistem durumlarının kullanılamamasını ele almanın yanı sıra, önerilen yöntem, zaman gecikmesi ve belirsizliklerin varlığında sağlam performans ve hızlı adaptasyon arasında bir uzlaşma yolu sağlar. Bu amaçla, gözlemci kazancı, çıkış tahmin hatasını önceden bilinen bir aralıkta tutmak için uyarlanabilir olacak şekilde tasarlanmıştır ve sistem çıkışlarını sınırlamak için kullanılır. Gözlemci, sistem belirsizlikleri ve bozulmalar varlığında tüm kapalı devre sisteminin titiz bir kararlılık analizi sağlar ve kapalı devre sisteminin yarı küresel olarak düzgün ve nihayetinde sınırlı olması garanti edilir. Bir sonraki adımda, giriş gecikmesi varlığında kapalı devre sisteminin kararlılığı analiz edilir ve önerilen gözlemci tabanlı denetleyicinin performansı, belirsiz 6 uzaktan kumandalı bir su altı aracında değerlendirilir. Ayrıntılı sayısal sonuçlar, önerilen denetleyiciyi kullanan sistemin integral mutlak izleme ve tahmin hatalarının, bu uygulama için diğer uyarlanabilir denetleyicilerden daha iyi performans gösterdiğini doğrulamaktadır. Ayrıca, sonuçlar önerilen yöntemin zamanla değişen bozulmaları ve belirsizlikleri reddetme yeteneğini doğrular ve sistem dinamikleri belirsiz olduğunda tatmin edici bir izleme performansı gösterir. Amaç & Kapsam: L1-adaptif bir yüksek-kazançlı büyüme ile birleştirilerek durum tahminini gerçekleştirmeyi ve kararlı olmayı hedefliyor. Uçuş/robotik uygulamalar için öne çıkıyor(Ahmadian et al. 2024). Yöntem: Çalışma, klasik L1 mimarisine bir

yüksek-kazançlı adaptif (HGO) entegre ediyor. Gözlemci, hızlı durum tahmini sağlar; L1 modülü ise adaptasyon kapsamını arttırıp ortaya çıkan kontrol sinyalinin alçak geçiren filtre ile yumuşatıyor. Lyapunov analizi: Makalede tahminci/gözlemci kanalı için Lyapunov fonksiyonu oluşumup, gözlem hataları ve parametre tahminlerinin sınırlılık'ı gösteriliyor; L1'in filtre seçimi ve adaptasyon artışları kararlılık koşulları açıkça ayarlanıyor. Sonuçlar: Simülasyonlarda HGO+L1 analizi, yalnız L1'e kıyasla daha hızlı durum yakalama ve daha düşük çıkış sapması verdi; kontrol sinyalindeki dalgalanmanın azalması. Güçlü/zayıf: Güçlü yan: parlaklığı-aydınlatmalı L1 daha iyi performans. Zayıf yan: HGO parametre seçimi hassas, pratik ölçüm ölçümü gürültü kirliliği dikkat edilmesi gereken nokta.

Model bilgisine güvenilmesi ve telafi mekanizmasının olmaması nedeniyle, Doğrusal Olmayan Dinamik Ters Çevirme (NDI) kontrolü, Ağırlık Merkezi'ndeki (CG) ani değişim gibi bozulmalar karşısında gerekli sağlamlığı sağlamaz. Bu eksikliği gidermek için, L1 adaptif yapısına dayanan yeni bir adaptif NDI kontrol yaklaşımı olan L1 Adaptif Doğrusal Olmayan Dinamik Ters Çevirme (L1-ANDI) sunulmuştur. Bu yaklaşım, bozulmaların ve belirsizliklerin etkisini aşarken istenen dinamik performansı garanti edebilir. Özellikle, düşük geçişli bir filtrenin tanıtılması, L1-ANDI kontrolünün hızlı adaptasyon ve sağlamlığın ayrıştırılmasını gerçekleştirmesini sağlar. Ayrıca, CG değişimlerinin uçak üzerindeki etkisi aerodinamik açıdan analiz edilir ve L1-ANDI tabanlı uçuş kontrolörü, CG değişimlerinin etkisini ortadan kaldıracak şekilde tasarlanmıştır. Bir dizi simülasyon sonucu, tasarlanan uçuş kontrolörünün tatmin edici bir performans elde edebileceğini ve CG ani değişimlerinin bozulmasına karşı sağlam olduğunu göstermektedir (Li et al. 2022). Amaç: Doğrusal Olmayan Dinamik İnversiyon (NDI) temelinde, L1'i kullanarak hızlı adaptasyon ve sağlamlık odaklı sunmak. Özellikle uçuş kontrol (uçuş kontrol) uygulamaları hedeflenmiştir. Yöntem: L1 yapı; Dinamik inversiyon tabanlı kontrolcünün adaptif parametrelerini tahmin ederken, kontrol sinyali üzerinde düşük geçişli filtre uygular. Bu, hızlı adaptasyonla birlikte kontrol sisteminin soğutulmasını sağlar. Lyapunov katkısı: Çalışmada tahminci-hata tabanlı Lyapunov fonksiyonu ile adaptörün sınırlılığı ve kapalı çevrim kararlılığı gösteriliyor. Ayrıca filtre bant genişliği seçim kriterleri (sağlamlık-performans dengesi) Lyapunov koşullarıyla ilişkilidir. Sonuç: Simülasyonlar (doğrusal olmayan uçuş modelinde) uyarılma kontrolünün belirgin biçimde iyileştirildiğini; L1'in saklanması sayesinde kontrol sinyallerinin kabul edilebilir sınır içinde kaldığı gösterildi. Değerlendirme: L1-ANDI pratik uygulamalar için umut verici; Ancak filtre/bant genişliği ayarları kritiktir.

Bu çalışma, durum uzayı alanında farklı özdeğerlere sahip ikinci dereceden kesirli mertebeden sistemler için adaptif bir kontrol sentezi önermektedir. Önerilen kesirli mertebeden adaptif denetleyici, skaler kesirli mertebeden sistemler sınıfı için MRAC denetleyicisinin genelleştirilmiş halidir. Kesirli mertebeden sistemi kontrol etmek için, sistem çıkışı ile seçilen bir referans model arasındaki hataya dayalı bir adaptif durum uzayı geri besleme denetleyicisi uygulanır ve kesirli mertebeden sistemin kesirli mertebeden referans modelini izlemesini sağlamak için kesirli bir adaptasyon yasası kullanılır. Elde edilen adaptif düzenleyicinin, kesirli mertebeden ikinci derece sistemi tatmin edici bir performansla stabilize edebildiğini gösteriyoruz. Bu performans özelliklerini gösteren bir simülasyon örneği ve önerilen kontrol şemasının üstünlüğünü göstermek için kesirli mertebeden kayan kipli bir kontrol (FOSMC) ile karşılaştırma sunulmaktadır. Amaç: MRAC'in durum-uzay durumunu ve belirli sınıflı sistemler için Lyapunov

tabanlı stabiliteyi büyütmeyi hedefliyoruz; Bazen fraksiyonel-derece sistemleri içerir. Yöntem & Analiz: Yazarlar state-space MRAC düzenini kurup Lyapunov adayı üzerinden parametre adaptasyonundan türetiyor. Ek olarak fraksiyonel-derece dinamikler için benzetimler yapıp stabilite koşulları uyarlanıyor. Simülasyon: Tipik referans- takip senaryoları; adaptasyon hızlarının performansına etkisi incelenmiş. Güçlü/yetersiz: Fraksiyonel-düzenlemede katkı değerli; Ancak fraksiyonel işlemin fiziksel ölçümü ve ölçüm pratiği üzerinde daha fazla sayıda parçanın taranması gerekmiyor (Khelas, Ladaci, and Bensafia 2024).

İnsansız Deniz Araçları (USV), kontrol teorisine dayanan ve otonom navigasyon ve görev yürütme

yetenekleriyle donatılmış, gemide personel ihtiyacını ortadan kaldıran gelişmiş su üstü araçlarıdır. USV'ler, su yüzeyinde çok çeşitli görevlerin yürütülmesini sağlamak için gelişmiş tahrik sistemleri, navigasyon sistemleri, iletişim sistemleri ve sensörler gibi en son teknolojileri entegre eder. Kontrol teorisi, USV'lerin tasarımında ve işletiminde önemli bir rol oynar. Bir USV'nin kontrol sistemi, su akıntıları, rüzgar yönleri ve deniz koşulları gibi çevresel bilgilerin sensörler aracılığıyla edinilmesini sağlayan gelişmiş otomasyon tekniklerine dayanır. Bu bilgiler daha sonra, önceden tanımlanmış görev hedeflerine ve gemi performans gereksinimlerine göre optimum navigasyon yolunu ve kontrol komutlarını otonom olarak hesaplayan kontrol algoritmalarına girilir. Sonuç olarak, USV'ler istikrarlı gemi navigasyonu ve doğru hedef tespiti sergiler. Amaç: MFAC tedavisini insansız deniz araçlarına (USV) uygulayıp model gerektirmeyen kontrolün pratikliğini göstermek. Yöntem: Çevrim içi veri-temelli kontrol kanalı (giriş/çıkış veri doğrusallaştırması) ile kontrol üretiliyor; Adaptasyon ve regülatör bileşeni Lyapunov-benzeri enerji kapasitesiyle analiz ediliyor. Analiz: Makale MFAC için kapalı çevrim sınırlılık görünümünü sunuyor; hava koşullarında bozulmalara dayanım testleri yer almaktadır. Sonuç: MFAC USV'de iyi takip ve dış etki reddi performansı sağlandı; Aralıkların durdurulması avantajı. Değerlendirme: MFAC pratik ve uygulanabilir; Ancak güvenlik / garanti koşulları (sert Lyapunov kanıtları) klasik yöntemle güçlü olamayabilir(Wang et al. 2024).

Bu makalede, Modelden Bağımsız Uyarlamalı Kontrol (MFAC) sisteminin performansı, yeni ve özgün bir hareketli kütle kontrollü (MMC) uçan robot sistemi üzerinde incelenmiştir. Bu makalede sunulan yeni bir serbestlik dereceli (1 serbestlik dereceli) MMC uçan robot test yatağı, değişken ağırlık merkezi (CoG) ve atalet momenti ile oldukça doğrusal olmayan ve yavaş dinamiklere sahiptir. Bu durum, sistemin kontrolünü zorlu bir problem haline getirmektedir. Bu zorluğun çözümlerinden biri, özellikle MFAC olmak üzere veri odaklı kontrol yöntemlerinin kullanılmasıdır. Bu kontrolör, sistemi yalnızca giriş ve çıkış (G/Ç) verilerini kullanarak kontrol etmek için veri odaklı bir model kullanır. Bu makale, bu veri odaklı kontrolörü, endüstride yaygın olarak kullanılan iki modelsiz ve model tabanlı kontrolör olan orantılı integral türev (PID) kontrol ve doğrusal ikinci dereceden regülatör (LQR) ile karşılaştırmaktadır. Karşılaştırma sonuçları, uygulanan çeşitli senaryolarda MFAC'nin PID ve LQR'ye göre açık bir üstünlüğe sahip olduğunu ve uyarlanabilir yapısının farklı senaryoların ve sunulan gürültünün uygulanmasında daha fazla hareket özgürlüğü sağladığını göstermektedir. Sonuçlar, İntegral Zamanlı Mutlak Hata (ITAE) kriteri kullanılarak elde edilmiş ve ortalama maksimum hata da bir Monte Carlo analizinde karşılaştırılmıştır. Daha detaylı bir çalışma için, kontrol enerjisi tüketim miktarı da karşılaştırılmış ve bu da MFAC'nin açık bir üstünlüğünü göstermiştir. Ayrıca, kontrolörün sağlamlığı, tesis parametrelerinde belirsizlik oluşturularak ve rastgele başlangıç

koşullarıyla 100 Monte Carlo simülasyonu çalıştırılarak gösterilmiştir. Son olarak, PID kontrolörüne rağmen, MFAC istenen senaryoları iyi takip etmiş ve LQR'ye kıyasla daha az enerji tüketmiştir. Sonuçlar, MFAC'nin, rastgele başlangıç koşulları ve gürültü varlığında, ortalama maksimum hata (%70,4), ortalama ITAE (%91) ve enerji tüketimi (%46) açısından PID ve LQR denetleyicilerinden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Amaç: MFAC'in bir hareketli kütle kontrollü uçuş robotundaki parçaları deri ve dijital olarak inceliyor. Yöntem: MFAC versiyonlarını teste tabi tutun; farklı dış etki ve parametre sapmalarında performans ölçümü yapılmıştır. Lyapunov-tarzi

sınırlandırmalar ile sınırlılık incelenmiş. Sonuçlar: MFAC, bilinmeyen parametre ve değişken veri koşullarında tatmin edici bir performans gösterdi; ancak parametre yakınsaması ve hassas ayrıntılar toplanır. Yorum: MFAC, robotik uygulamalarda hızla benimseniyor; Ancak Lyapunov garantileri literatürde çeşitleniyor(Heydari et al. 2024).

Olay tetiklemeli çıktıya sahip doğrusal olmayan sistemler için sezgisel bulanık sinir ağına dayalı modelsiz uyarlanabilir kontrolü sunmaktadır. Esasen, modelsiz uyarlanabilir kontrol (MFAC), sözde kısmi türev (PPD) formu kullanılarak kontrollü sistemin çevrimiçi yaklaşık bir modelinin

oluşturulmasıyla oluşturulur. Önerilen şemaya göre,

ilk olarak, MFAC tekniği için hem kompakt form dinamik doğrusallaştırma (CFDL) hem de kısmi form dinamik doğrusallaştırmada (PFDL) zamanla değişen PPD için bir tahmin edici olarak sezgisel bulanık bir sinir ağı (IFNN) geliştirilmiştir. İkinci olarak, iletişim kaynaklarından tasarruf etmek ve hesaplama yükünü ve enerji tüketimini azaltmak için iki periyodik olay tetiklemeli çıktı yöntemi, önerilen IFNN tabanlı MFAC'nin her iki formuna entegre edilmiştir. Lyapunov teorisi ve BIBO kararlılık yaklaşımına dayanarak, IFNN kontrolörünün adaptif yasaının ve kapalı devre sisteminin izleme hatası sınırının yakınsamasını garanti altına almak için gerekli koşullar oluşturulmuştur. Üçüncü olarak, geliştirilen kontrol yönteminin uygulanabilirliği ve etkinliği ile ilgili olarak, sürekli karıştırmalı tank reaktör (CSTR) sistemi ve ısı eşanjörü sistemi dahil olmak üzere iki simülasyon örneği verilmiştir. Son olarak, önerilen veri odaklı kontrol yönteminin pratik doğrulaması, bir DC motorunun hız kontrolü yoluyla gerçekleştirilmiştir. Amaç: Ana hedef, zamanla anahtar-değişen (anahtarlama) lineer sistemlerde MRAC'ın kararlılık kriterlerini genişletme; bekleme süresi ve zamanla değişen Lyapunov süresinin kullanılması. Yöntem: Yazarlar zamanla değişen Lyapunov fonksiyonu ve bekleme süresinden tasarruf kullanarak MRAC tasarımını büyütüyor; parametre belirsizliği altında güvenli takip sürdürülmesi amaçlanıyor. Sonuç: Teorik koşullar ve örnek hesaplamalar veriliyor; Bekleme süresi seçiminin kararlaştırılması için kritik olduğu vurgulanıyor. Değerlendirme: Anahtarlama sistemler pratikte önemli (mod değişimli sistemler), çalışma faydalı bir katkı sunuyor (Abd-Elhaleem et al. 2024).

Şerit takip uygulaması için yanal hata dinamiklerine sahip araçların kararlı ve sağlam kontrolü sorunu ele alıyoruz. Şeritten ayrılma, trafik kazalarındaki ölümlerin yarısının temel nedenidir ve bu da kararlı, uyarlanabilir ve sağlam kontrolörlerin geliştirilmesini bir zorunluluk haline getirir. Geleneksel doğrusal geri beslemeli kontrolörler tatmin edici bir izleme performansı sağlar, ancak sisteme belirsizlikler eklendiğinde kararsız davranışlar sergilerler. Direksiyon açısı girdisinde meydana gelen herhangi bir bozulma veya belirsizlik, araç için felaket olabilir. Bu nedenle, bu tür belirsizlikleri aktif olarak ele alacak kontrolörler geliştirilmelidir. Bu çalışmada, önden direksiyonlu bir Ackermann aracının yanal hata dinamiklerindeki belirsizlikleri öğrenen ve kararlılık ve sağlamlığı garanti eden bir Nöral L1 Uyarlamalı kontrolör (Nöral-L1) sunuyoruz. Katkılarımız üç yönlüdür: Geleneksel L1 Uyarlamalı kontrolörlerin garantili kararlılığı ve sağlamlığı için teorik sonuçları Nöral-L1'e genişletiyoruz; ii) Şerit takip uygulaması için dinamiklerdeki belirsizlikleri doğru bir şekilde öğrenen bir Neural-L1 uyguluyoruz; iii) Neural-L1'in performansını fizik tabanlı bir simülatör olan PyBullet üzerinde değerlendiriyoruz ve belirsizliklerin varlığında Neural-L1'in diğer son teknoloji kontrolörlere kıyasla üstün referans yörünge izleme performansını göstermek için F1TENTH platformuyla kapsamlı gerçek dünya deneyleri yürütüyoruz. Amaç: L1 mimarisi ile yapay sinir ağlarını (NN) birleştirerek, yanal kontrollere uyum sağlayarak öğrenen bir yapı sunar. Yöntem: NN tahminleri adaptör içinde kullanılır; L1 filtresi kontrol çıkışını yumuşatıyor. Lyapunov-benzeri performans hızı NN parametre güncelleme kurallarıyla kaydediliyor. Sonuç olarak: L1+NN iletişimi, iletim-yol aktarımlarında daha iyi takip sunuyor; NN genel hataları yakalıyor, L1 ise sağlamlığını koruyor (Mukherjee et al. 2024).

Bu makalede, küçük İnsansız Hava Araçları'nın (İHA) çıkış geri beslemeli adaptif kontrolü için bir yaklaşım sunulmaktadır. Tasarım, durum öngörücüsü yerine bir durum gözlemcisine dayanmaktadır. Başlıca avantajı, tam durum ölçümünün önlenmesi ve kontrolcünün tasarım ve uygulamasının basitleştirilmesidir. Ayrıca, durum alanı tanımı korunduğu için, belirsizlikler de dahil olmak üzere sistem dinamikleri fiziksel öngörüyle belirlenebilir ve bu da pratik uygulamaları basitleştirir. Uyarlama yasası, dış bozulmaların bilinmeyen sınırlarını tahmin etmek için kayan kipli kontrolden yararlanır. Küçük bir İHA'nın kontrolü için uçuş testi sonuçları, mi1 adaptif kontrolcünün büyük

belirsizliklere ve bozulmalara karşı dayanıklılığını göstermektedir. Amaç: L1'in sadece tam durum değil geri dönüş halinde de uygulanabilirliği gösterilmektedir (sensör kısıtlayıcı olan UAV'ler için). Yöntem & Analiz: Çıkış- geribildirim L1 yapısı öngörücü ve adaptör veriliyor tasarımı; Lyapunov analizinde ek veri hata terimleri ele alınıyor. Sonuç: Simülasyon ve küçük-ölçek uçuş deneyleri L1'in çıktı-geribildirim şeklinde de doğrulanıyor(Souanef 2023).

Model referanslı adaptif kontrolün (MRAC) amacı, bilinmeyen bir dinamik sistemin yörüngelerinin belirli bir referans modelin yörüngelerini takip etmesini sağlamaktır. Bu, kapalı devre sistemden çevrimiçi toplanan verileri kullanarak kazanımlarını adaptif olarak değiştiren bir geri besleme denetleyicisi aracılığıyla yapılır. MRAC

problemini çözme yaklaşımlarından biri, kazanımların sözde eşleştirme denklemlerinin bir çözümüne yakınsamasını garanti eden koşullar uygulamaktır. Literatürde, bu yakınsama için gereken veriler üzerindeki koşulları zayıflatmak amacıyla kalıcı uyarma kavramının çeşitli uzantıları önerilmiştir. Bu çabalara rağmen, MRAC'ın yakınsamasını sağlayan en zayıf veri gereksinimlerinin neler olduğu tam olarak anlaşılamamıştır. Bu makalede, veri bilgiselliği kavramını kullanarak MRAC problemini incelemek için yeni bir çerçeve öneriyoruz. Temel katkımız, adaptif kazanımların eşleşen denklemlerin çözümüne asimptotik yakınsaması için gerekli ve yeterli koşulları sağlamaktır. Bu gerekli ve yeterli koşullar, kapalı devre sistem tarafından yeni veriler üretildikçe doğrusal cebir aracılığıyla çevrimiçi olarak kolayca kontrol edilebilir. Sonuçlarımız, mevcut uyarma koşullarının toplanan verilere gerekenden daha güçlü gereksinimler yüklediğini ortaya koymaktadır. Özellikle, bu makalede sağlanan gerekli ve yeterli koşullar, benzersiz sistem tanımlaması için olanlardan daha zayıftır. Amaç: MRAC için veri gereksinimleri (persistent excitation vb.) konusunda daha zayıf ve gerçekçi şartlar koyan bir çerçeve önermek. Yöntem & Katkı: Data-informativity kavramı ile MRAC'ın yakınsama koşullarını yeniden formüle ediyor; Lyapunov temelli argümanlar veri zenginliğiyle ilişkilendiriliyor. Değerlendirme: Teorik katkı; MRAC uygulamalarında gerçek veri sınırlamaları göz önüne alındığında önemli(Wang, Baldi, and van Waarde 2025).

Günümüzde çok sayıda endüstriyel, tıbbi ve bilimsel uygulama, büyüyen robotik sektörü için olmazsa olmaz olan robotik manipülatörlere dayanmaktadır. Bu manipülatörler, hassasiyet, uyarlanabilirlik ve esnekliği dikkate alan gelişmiş kontrol algoritmaları olmadan iyi çalışamazlar. Bu çalışma, robotik manipülatörler için kontrol stratejilerinin birçok türünü, uygulamasını ve işlevini listelemeye odaklanmıştır. İnceleme, kablo tahrikli, paralel ve seri modeller gibi konuları içeren manipülatörlere genel bir bakışla başlar. Ardından, her türün benzersiz mekanik ve işlevsel özellikleri bağlamsallaştırılır. Sonraki bölümler, PID ve doğrusal kontrol gibi geleneksel tekniklerden makine öğrenimi ve yapay zeka gibi hibrit kontrol çerçevelerini entegre eden karmaşık sistemlere kadar bir dizi kontrol prosedürünü kapsar. Bu kapsamlı analiz, görev esnekliği, hesaplama verimliliği ve çevresel belirsizlik gibi bazı kalıcı sorunları ve her yaklaşımın avantaj ve dezavantajlarını ele alır. Bu çalışma, federatif öğrenme, blok zinciri entegrasyonu ve kuantum hesaplama gibi yeni ortaya çıkan alanları vurgularken, aynı zamanda gelecekteki olası araştırma konularını da belirlemektedir. Mevcut bilgileri bir araya getirerek ve potansiyel gelişmeleri özetleyerek, çalışma araştırmacılara ve mühendislere robotik manipülatörlerin kontrolünü iyileştirmek ve böylece zorlu çalışma ortamlarında performansı ve güvenilirliği artırmak için bir referans sağlamaktadır. Bu çalışmanın bulguları, gelişmiş kontrol metodolojilerinin etkinliğini göstermekte ve gelecekte robotik manipülasyonu dönüştürebilecek ilerlemelerin önünü açmaktadır. Amaç: MRAC'i sinir ağlarıyla (NN) ve zaman gecikmesi kestirimciyle (TDE) birleştirip robot kollarında robust takip sağlamak. Yöntem: NN, bilinmeyen dinamikleri modellemeye çalışıyor; TDE gecikme kaynaklarını azaltıyor; MRAC adaptasyonu Lyapunov çerçevesinde bütünleştiriliyor.

Sonuç: Simülasyonlar güçlü takip ve gecikme bağışıklığı gösteriyor; ancak NN eğitimi ve TDE

parametreleri hassas(Waseem et al. 2025).

Quadrotor helikopterlerin kullanımı hem askeri hem de ticari alanlarda oldukça talep görmektedir. Uygulama alanına bağlı olarak, bu insansız hava araçlarının manevra kabiliyeti için özel gereksinimler gerekebilir. Geleneksel kontrolör yapıları bu talepleri karşılayamamakta ve bu durum geliştiricileri yenilikçi çözümler aramaya yöneltmektedir. Bu çalışmada, quadrotor helikopterlerin tutum kontrolü için performans gereksinimlerini karşılamak üzere bir kazanç planlama kontrolörü önerilmiştir. Bu bağlamda, quadrotor helikopterin çalışma bölgesinde önerilen bir kurala göre farklı çalışma noktaları seçilmiş ve doğrusal modellerin gerekli dönüşümünden sonra bir kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, quadrotorların zamanla değişen bozucu etkilere karşı sağlamlığı bir denetleyici sinir ağı (YSA) kontrolörünün uygulanmasıyla sağlanmıştır. Özellikle, gradyan iniş tabanlı denetimli öğrenme kullanılarak eğitilen bir radyal tabanlı fonksiyon YSA (RBFNN) kullanılmıştır. Önerilen denetleyicinin tepkisi, geleneksel orantılı türev denetleyicinin tepkisiyle sayısal olarak karşılaştırılmıştır. İşlemci gücü açısından geleneksel denetleyicilerden çok da farklı olmayan önerilen denetleyici, geniş bir çalışma bölgesinde istenen performans kriterlerini sağlamaktadır. Son olarak, ileri beslemeli YSA denetleyicisiyle geliştirilen kazanç planlama denetleyicisi, zamanla değişen kesintiler altında test edilmiş ve hatalarda önemli bir azalma sağlanmıştır. Amaç: Quadrotor attitude kontrolü için gain-scheduling yapısına NN tabanlı bir süpervizör ekleyerek çalışma noktası seçimini

otomatikleştirmek. Yöntem: Çizelgeleme noktaları arası geçişlerde NN, performans ölçütüne göre en uygun kontrol kazancını seçiyor; Lyapunov analizi için common-Lyapunov şartları incelenmiş. Sonuç: Otonom geçişler ve ani manevralarda iyileşme; fakat NN güvenilirliği ve eğitim kapsamı önem kazanıyor(Adıgüzel, Kurtuluş, and Türker 2024).

Bu makalede, Sağlam Model Referans Uyarlamalı PI (Orantılı-İntegral) Denetleyicinin ayrık zamanlı Lyapunov kararlılık analizi sunulmaktadır. Bu denetleyicinin matematiksel gelişimi, tüm kapalı devre sistem sinyallerinin sınırlılığını sağlayan ve genel kararlılığını garanti eden Sağlam Model Referans Uyarlamalı Kontrol felsefesine dayanmaktadır. Elde edilen denetleyici, uyumlu ve uyumsuz dinamiklere karşı sağlamlık özellikleri göstermekte, uyarlanabilir kazançların bir çözüm kümesine ve izleme hatasının kararlı durumda bir kalıntı kümesine yakınsamasını garanti etmektedir. Ayrıca, bunu uygulamak için, tesis hakkında gereken tek bilgi, göreceli derecesi ve kazanç sinyalidir. Denetleyicinin simülasyon sonuçları, kararsız, minimum olmayan fazlı bir tesiste ve pratik bir tesiste uygulanarak sunulmaktadır. Ayrıca, bir Sağlam Model Referans Uyarlamalı Denetleyici ile karşılaştırılmış ve daha yüksek performans göstermiştir. Amaç: Robust MRAC yapısına PI terimi eklenip discrete-time Lyapunov analizleriyle kararlılık ispatı sunulmuş. Yöntem & Sonuç: Discrete Lyapunov fonksiyonu kullanılarak MRAC- PI'nin boundedness'i gösterilmiş; pratik uygulamalarda integral eylemin faydası vurgulanmış(de Oliveira Evald et al. 2022).

Zamanla değişen kazançlara sahip PID yapılı bir denetleyici, modelsiz adaptif kontrol (MFAC) metodolojileri kullanılarak tanıtılmıştır. MFAC, sistemin giriş/çıkış (G/Ç) verilerini kullanarak yalnızca kontrol girdisi üretmek için kontrol odaklı doğrusallaştırılmış bir veri modeli kullanır. Veri modeli yapılarından biri, doğrusallaştırılmış modelde önceki G/Ç'nin zaman penceresinin etkisini dikkate alan tam biçim dinamik doğrusallaştırma (FFDL). FFDL'deki belirli bir G/Ç pencere uzunluğu, ayrık çok değişkenli PID türüne benzer bir yapıya sahip bir MFAC denetleyicisine yol açar. Ancak, kontrol hedef fonksiyonunu değiştirerek, benzer PID yapılı (PID'ler) denetleyici, kompakt biçim dinamik doğrusallaştırma (CFDL) tekniğini kullanan daha az gelişmiş bir veri modeli kullanılarak gerçekleştirilebilir. Yeni PID'sMFAC-CFDL ile MFAC-FFDL tarafından geliştirilen sistemin karmaşıklığı, MIMO sistemleriyle çalışırken ayarlanabilir toplam parametre sayısı açısından

karşılaştırılmıştır. Kontrolörler ayrıca, doğrusal olmayan bir MIMO üç tanklı sistemin (3TS) simüle edilmiş bir modeline de uygulanmıştır. Sonuçlar, yeni yaklaşım dikkate alındığında, ayarlanacak parametre sayısının önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, PIDsMFAC-CFDL, daha az hata ve daha az enerji tüketimiyle verilen referansa doğru sorunsuz bir geçiş sağlar. Amaç: PID yapılı MFAC yaklaşımlarını karşılaştırıp gerçek zamanlı uygulamaları uygun bir yapı öneriyor. Yöntem: Farklı MFAC yapı yapıları (FFDL vb.) PID-benzeri formlarda değerlendirilip Lyapunov benzeri stabilite koşulları tartışılmıştır. Sonuç: PID benzeri MFAC, endüstriyel uygulamalara adaptasyonu kolaylaştırıyor; Teorik Lyapunov garantileri ayrıntılı olarak sağlanabiliyor(Salighe and Söffker 2024).

L1 adaptif kontrolünün küçük ölçekli insansız helikopterlerin hız otopilot döngüsüne uygulanmasına odaklanmaktadır. L1 adaptif kontrol tekniği, özellikle dış etkenler ve model belirsizlikleriyle başa çıkmada güvenilir hız kontrolü sağlama potansiyeli açısından araştırılmaktadır. L1 adaptif kontrolü yaygın olarak incelenmiş olsa da, küçük ölçekli insansız helikopterlere uygulanması nispeten keşfedilmemiştir. Sayısal simülasyonlar ve küçük bir döner kanatlı platformda yürütülen ön deneysel test kampanyası aracılığıyla bu makale, L1 adaptif kontrolünün insansız helikopter platformlarında hız düzenlemesi için umut verici bir çözüm olduğunu doğrulamaya katkıda bulunmaktadır. Bu uygulamalı çalışma, L1-Adaptive kontrolün küçük ölçekli insansız helikopterlerin hız kontrolünde uygulanmasını gösteriyor. L1 yapısı; çevrim içi parametre tahmini, predictör ve kontrol kanalında alçak geçiren filtre içeriyor. Makalede Lyapunov-bazlı boundedness argümanları verilerek parametre tahminlerinin sınırlı kaldığı ve kapalı çevrimin kararlı olduğu gösteriliyor. Deneysel/sayısal sonuçlar; L1'in dış rüzgâr bozucu ve model belirsizliklerine karşı üstün performans sağladığını gösteriyor. Ayrıca filtre bant genişliğinin seçim kısıtları ve uygulamada gecikmelerin etkisi tartışıldı. Çalışma L1'in küçük hava araçlarına uygulanabilirliğini kanıtıyor; uygulamada sensör gürültüsü ve gerçek-zamandaki hesaplama sınırlamaları göz önünde tutulmalı(Bertolani et al. 2024).

Bilinmeyen yay sertliği ve sönümlleme katsayılarına sahip araç aktif süspansiyon sistemleri için, süspansiyon sistemlerinin performansını iyileştirmeyi amaçlayan bir model referans adaptif kontrol (MRAC) tasarımı önermektedir. İlk olarak, yarım araç aktif süspansiyon sisteminin matematiksel bir modeli sunulmakta, ardından gökyüzü kancası sönümlleme konseptini kullanan bir yarım araç süspansiyon sisteminin referans modeli önerilmektedir. Aktif süspansiyon sisteminin dinamik tepkilerinin referans modelin dinamik tepkilerini iyi bir şekilde takip etmesini garanti eden MRAC için kontrol yasası ve adaptasyon yasaları, Lyapunov kararlılık kriterlerine dayalı olarak türetilmiştir. Önerilen referans modelin avantajlarını ve tasarlanan MRAC'ın verimliliğini değerlendirmek için, referans modelin, pasif ve aktif süspansiyon sistemlerinin dinamik tepkileri hem frekans hem de zaman alanlarında analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, MRAC'lı aktif süspansiyon sisteminin, pasif süspansiyon sistemine kıyasla sürüş konforu ve süspansiyon sapması açısından daha iyi bir performans sağladığını göstermiştir. Makale, yarım-arac (half-car) aktif süspansiyon problemi için MRAC tabanlı bir tasarım sunuyor. Araç süspansiyon parametrelerindeki belirsizlikler için referans model tanımlanıyor ve Lyapunov adayına dayalı adaptasyon kuralı türetiliyor. Analizde, Lyapunov türevinin negatif yarı-tanımlı olması için gerekli koşullar ve adaptasyon kazançlarının seçimi detaylandırılıyor; tasarımın ride comfort ve road holding performansı üzerindeki etkisi sayısal simülasyonla gösteriliyor. Sonuçlar MRAC'ın parametre belirsizliklerine rağmen istenen model çıkışını sağladığını ortaya koyuyor. Uygulamada sensör ve aktüatör kısıtları göz önüne alınmalı(Nguyen 2024).

Aktüatör doygunluğuna sahip çoklu etken sistemlerinin iki taraflı mutabakat problemini incelemektedir. İlk olarak, her etken sisteminin sınırlı kontrollere asimptotik olarak sıfır kontrollü

olduğunu (ANCBC) varsayalım. İletişim topolojileri, yapısal olarak dengeli ve bir kapsayan ağaç içeren işaretli yönlendirilmiş bir graftır. İkinci olarak, değişmez küme (elipsoid) teorisine dayalı ayrık bir kazanç planlama yöntemi önerilmiştir. Ardından, çoklu etken sistemlerinin ayrık zamanlı anahtarlama kontrol yasası, parametrik Lyapunov denklem yöntemi kullanılarak tasarlanmış ve çoklu etken sistemlerinin dinamik performansı ayrık anahtarlama parametreleriyle iyileştirilmiştir. Ayrıca, sistemin yakınsaması Lyapunov teorisine dayalı olarak analiz edilmiştir. Son olarak, simülasyon sonuçları önerilen geri besleme yasasının etkinliğini göstermektedir. Bu çalışma, input-saturated ve switched (mod değişimli) sistemler için continuous dynamic gain-scheduling stratejisi sunuyor. Tasarımda çalışma noktaları arasında sürekliliği koruyan kazanç geçişleri ve Lyapunov-tabanlı stabilite koşulları öne çıkıyor. Analiz, hem saturasyon etkisini hem de switching'i birlikte ele alarak global stabilize koşullarını veriyor. Simülasyonlar, önerilen yöntemin performans artışı sağladığını gösteriyor(Wang, Wang, and Gao 2022).

Senkron relüktans motorlar (SynRM'ler), yüksek tork yoğunluğu, düşük maliyeti ve sağlam tasarımı nedeniyle son zamanlarda daha fazla ilgi görmektedir. Değişken hızlı sürücüler alanında, SynRM'ler endüksiyon motorlarından %2-%4 daha verimli ve %15-%20 daha ucuzdur. Bu nedenle, SynRM'ler ticari ürünlerde endüksiyon motorları ve sabit mıknatıslı senkron motorlar için iyi bir alternatif olarak daha sık kabul edilmektedir. Bu nedenle, elektrikli araçlar, HVAC'ler, asansörler ve soğutuculara uygulamaları son zamanlarda gözlemlenmiştir. SynRM'lerin yüksek tork yoğunluğu doğrusal olmayan manyetik doygunluk özellikleriyle birlikte geldiğinden, bu motorların yüksek performanslı kontrolü gelişmiş kontrol algoritmaları gerektirir. 'de, SynRM'nin sağlam kontrolünü sağlamak için doğrusal bir matris eşitsizlikleri uygulanır. Böyle bir yaklaşım, akımların ve hız referanslarının iyi izlenmesini, uygun dinamik tepkileri ve azaltılmış çapraz kuplaj etkilerini sağlar. Öte yandan, denetleyicinin sentez süreci, uzmanlık bilgisi gerektiren Lyapunov yaklaşımına dayanmaktadır. Bu çalışmada, SynRM için adaptif bir geri adımlama hız denetleyicisi önerilmiştir. SynRM'nin amper başına maksimum tork (MTPA) çalışma koşullarındaki geçici dinamik tepkisini iyileştirmek için, tekrarlayan bir Hermite bulanık sinir ağı uygulanmıştır. Ele alınan kontrol yapısı için elde edilen sonuçların, klasik PI tabanlı kontrol yapısının dezavantajlarının üstesinden geldiği unutulmamalıdır. Öte yandan, tekrarlayan Hermite bulanık sinir ağının tasarım süreci kolay görünmemekte ve genel kontrol yapısı kademeli bir yapıya dayanmaktadır. Sonlu kontrol kümesi modellenen öngörücü denetleyicinin PI hız denetleyicisiyle birlikte SynRM'yi kontrol etmek için kullanıldığı kademeli kontrol yapısı kavramı da kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, elektromanyetik torkun hızlı dinamik tepkisini, iyi performansı ve daha az tork dalgalanmasını garantilemek için aktif akı modellenen öngörücü kontrol geliştirilmiştir. Motor sürücü uygulaması bağlamında gain-scheduling yaklaşımıyla performans iyileştirmesi gösteriliyor. Makale çalışma noktalarına göre yerel lineer kontrol kazançları hesaplıyor ve scheduling ile global performans sağlanıyor; Lyapunov tarzı ortak P fonksiyonu veya çalışma noktası bağımlı fonksiyonlar üzerinden stabilite yorumlanıyor. Endüstriyel uygulamalarda gain- scheduling'in pratikliğini vurgulayan bir çalışma(Tarczewski, Niewiara, and Grzesiak 2021).

MBRL algoritmalarını güçlendirmek için bir eklenti şeması olarak L1-MBRL çerçevesini öneriyoruz. Bu çerçeve, epistemik ve aleatorik belirsizliklere karşı gelişmiş sağlamlık sunuyor. Öğrenilen modeli, L1 kontrol girişinin tasarlandığı bir kontrol-afin modeli oluşturmak için anahtarlama yasasına göre kontrol uzayında afinite ediyoruz. Anahtarlama yasası tasarımı, L1 uyarlanabilir kontrolünün sunduğu sağlamlık avantajlarından yararlanırken, L1 uyarlanabilir kontrol mimarisi içindeki durum tahmincisinin tahmin performansı sınırını açıkça kontrol etme konusunda benzersiz bir yetenek sağlıyor. L1 eklentisi, temel MBRL algoritmasında herhangi bir değişiklik gerektirmedikinden, temel MBRL algoritması seçiminden bağımsızdır. L1-MBRL şemasının

etkinliğini değerlendirmek için, eylem veya gözlem gürültüsü içeren senaryolar da dahil olmak üzere birden fazla ortamda iki temel MBRL algoritması kullanarak kapsamlı sayısal simülasyonlar gerçekleştiriyoruz. Sonuçlar, L1-MBRL şemasının, L1 denetleyicisinin bir senaryodan diğerine yeniden tasarlanmasına veya ayarlanmasına gerek kalmadan, temeldeki MBRL algoritmalarının performansını artırdığını açıkça göstermektedir. Bu arXiv çalışma, Model-Based RL algoritmalarını L1 adaptasyonu ile zenginleştirerek güvenli ve daha hızlı öğrenen kontrolcüler üretmeyi hedefliyor. Yöntem, öğrenilen modelin belirsizliklerini L1 adaptörle telafi eder; Lyapunov-benzeri argümanlarla kapalı yönün boundedness'i ve performans garantileri tartışılıyor. L1-MBRL, model öğrenme hatalarının kontrol halkasına olumsuz etkisini azaltmayı amaçlıyor; simülasyonlarda daha hızlı güvenli öğrenme gösteriyor(Sung et al. 2024).

Doğrusal olmayan zaman ve durum bağımlı belirsizliklere maruz kalan doğrusal sistemler için bu makale, istenen kontrol performansını elde ederken durum kısıtlamalarının karşılanmasını kolaylaştıran entegre bir bariyer durumu ve L1 uyarlanabilir kontrol mimarisi olan BaS-L1'i sunmaktadır. Bariyer durumları, belirsizlikleri dikkate almadan, orijinal dinamikleri güçlendirmek ve güvenlik kısıtlamalarını kodlamak için ilk olarak benimsenir ve bir temel denetleyici oluşturulur. Daha sonra, belirsizliklerin varlığında kontrol performansını ve kısıtlamaların karşılanmasını sağlamak için belirsizlikleri telafi etmek üzere L1 uyarlanabilir denetleyici kullanılır. Önerilen kontrol mimarisinin etkinliği, bir F-16 uçağının boylamsal dinamikleri kullanılarak yapılan simülasyonlarda test edilmiştir. Bu konferans bildirisi, state-input kısıtlı sistemler için L1 adaptasyonunu barrier-states (engelleyici durumlar) ile birleştiriyor. Lyapunov çerçevesi içinde barrier fonksiyonlarının etkisi ve adaptasyonun kısıtları ihlal etmeden çalışması inceleniyor. Uçuş kontrolü gibi uygulamalarda kısıtlı giriş/çıkış koşullarına uyumu sağlayan pratik bir yaklaşım sunuluyor(Aoun et al. 2023).

Belirsiz parametrelere sahip anahtarlama doğrusal sistemler sınıfı için model referanslı uyarlamalı kontrolü, bekleme süresi anahtarlama altında inceler. İlk olarak, bekleme süresi tekniği çerçevesinde artış katsayılı zamanla değişen Lyapunov fonksiyonunun tanıtılmasıyla model referanslı uyarlamalı kontrol sentezi için yeterli koşullar türetilir; burada bekleme süresi keyfi olarak önceden belirlenmiş bir sabittir. İkinci olarak, anahtarlama sistemin durumunun referans anahtarlama sistemin durumunu asimptotik olarak izlemesini sağlamak için bir uyarlamalı denetleyici önerilir. Üçüncü olarak, önerilen Lyapunov fonksiyonuna dayanarak, bekleme süresinin alt sınırı kısıtlanır, aktif alt sistemin iki ardışık anahtarlama zamanı arasındaki Lyapunov fonksiyonunun azalması sınırlandırılır, tüm anahtarlama sistemin enerjisi azaltılır ve hata sisteminin asimptotik kararlılığı sağlanır. Daha sonra, referans sürekli olarak uyarılırsa, kapalı devre hata sistemi asimptotik olarak kararlıdır ve parametre tahmin hatası asimptotik olarak sifıra yakınsar. Son olarak, önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak için bir elektro-hidrolik sistem örnek olarak alınır. Switched (mod geçişli) sistemlerde MRAC tasarımı; dwell-time şartları ve zaman-varyan Lyapunov adayları ile kararlılık koşulları sunuyor. Makale, geçiş sıklığı ve adaptasyon hızlarının kararlılık üzerindeki etkisini açığa çıkarıyor. Sonuçlar, MRAC'in switching durumda da uygun koşullarla güvenli çalışabileceğini gösteriyor(Ma, Xia, and Qu 2024).

MRAC yöntemi, uyarlamalı kontrolün en erken geliştirilen ve en yaygın kullanılan yaklaşımlarından biridir. Temel fikir, kontrol edilen sistemin çıkışının belirlenen bir referans modelin çıkışını takip etmesini sağlamaktır(Gökce 2007). Uyarlama yasası, sistemin model parametrelerindeki belirsizlikleri telafi edecek şekilde çevrimiçi olarak güncellenir.

Lyapunov kararlılık teorisi MRAC'in temelini oluşturur; bu yöntemle sistemin kapalı çevrim hata dinamiklerinin asimptotik olarak sifıra yakınsadığı gösterilir. Narendra ve Annaswamy (1989) tarafından sunulan klasik MRAC analizinde, uygun bir Lyapunov fonksiyonunun türevi negatif tanımlı

seçilerek kararlılık garanti edilmiştir. Ancak MRAC sistemleri, yüksek frekanslı gürültü ve parametre dalgalanmalarına karşı hassas olabilmektedir(Rao 2014).

Model referanslı adaptif kontrol (MRAC), farklı adaptasyon mekanizmaları kullanılarak tasarlanabilir. Bir adaptasyon mekanizması, Model Referanslı Adaptif Sistem (MRAS) performansını etkileyebilir. Yüksek adaptif kazanç, mükemmel koşullar altında bile (zaman gecikmesi olmadan, eşsiz belirsizlik olmadan ve bozulma olmadan) MRAS'ın sağlamlığını azaltırken, geçici tepki performansını artırır ve klasik MRAC'daki kontrol sinyali salınımını artırır(Nguyen 2018). Klasik MRAS, bu tür zaman gecikmeli adaptif sinyallerde tatmin edici bir performans göstermez. Bu çalışma, MRAS'daki iki farklı adaptasyon mekanizmasını sunar ve karşılaştırır: MRAC üzerinde düşük frekanslı öğrenme yöntemi ve PI ayarlama mekanizmalı MRAC. Zaman gecikmeli sistemde PI ayarlama mekanizmalı MRAC kadar iyi bir geçici tepki elde etmek için MRAC üzerinde düşük frekanslı öğrenme yönteminde bir değişiklik önerdik. En iyi performans, PI adaptasyon mekanizmalı MRAS'tan elde edilir. MRAC, havacılık, robotik ve yenilenebilir enerji sistemlerinde en yaygın kullanılan adaptif denetleyicilerden biridir(Lavretsky and Wise 2012). MRAC üzerindeki önemli faktörlerden biri, adaptasyon mekanizmalarının nasıl etkili bir şekilde tasarlanacağıdır. Uyarlama mekanizmaları, MRAC üzerinde üç farklı yöntem kullanılarak tasarlanabilir. Bunlar, Popov hiperstabilite tabanlı, Lyapunov tabanlı veya gradyan tabanlı adaptasyon mekanizmalarıdır. MRAC'da farklı adaptasyon mekanizmaları için uygun bir Lyapunov fonksiyon aday bulmak zor olduğundan, Popov'un hiperstabilite teorisi kullanılarak MRAC için PI (orantılı ve integral) ve PID (orantılı, integral ve türev) gibi adaptif mekanizmalar geliştirilmiştir. Bununla birlikte, literatürde Lyapunov fonksiyonları kullanılarak MRAC üzerindeki adaptasyon mekanizmalarını belirlemek için kullanılmıştır. Uyarlama mekanizmasında bir entegratör bulunan MRAC denetleyicilerinde, entegratörün öğrenme hızını artırmak sistemin zaman gecikmesi marjını azaltır(Parks 1966). Zaman gecikmesi marjı, uyarlama mekanizmasında normalizasyon kullanılarak bir dereceye kadar artırılabilir, ancak normalizasyon, uyarlama ve geçici performansın yakınsama hızını yavaşlatır. Yazarlar, CMRAC, uyarlanabilir bir pozitif yayın denetleyicisi ve sınırlı kazançlı bir unutma yasasını birleştiren zaman gecikmesine dayanıklı bir MRAC tasarladılar. Bu değişiklikleri MRAC'a ayrı ayrı uygulamak, sistemin geçici tepkisini klasik MRAC'a kıyasla iyileştirdi. Bu değişikliklerin MRAC ile birleştirilmesi, zaman gecikmeli bir sistem için sistem performansını daha da artırır(Chandrasekhar and Rao 1982).

L1-Adaptive Control, MRAC'in bazı sınırlamalarını gidermek üzere geliştirilen modern bir uyarlamalı kontrol yapısıdır. Ana farkı, hızlı parametre tahminiyle birlikte düşük frekanslı kontrol sinyali üretmeyi hedeflemesidir(Hovakimyan and Cao 2010). Hovakimyan ve Cao (2010) tarafından önerilen L1 mimarisi, uyarlama kanalı ile kontrol kanalı arasına bir alçak geçiren filtre (low-pass filter) ekleyerek sistemin kararlılığını ve sağlamlığını artırır (Gahlawat et al. 2020). Lyapunov temelli analiz, L1-Adaptive Control'de sistem hatasının sınırlı kalacağını ve hızlı uyarlamanın kararlılığı bozmayacağını gösterir. Bu yöntem özellikle belirsizlik altında çalışan uçak, robot manipülatörleri ve otonom sistemlerde yaygın olarak uygulanmaktadır(Gregory et al. 2009). Doğrusal sistemler için kontrolörler, Bode grafikleri, Nyquist grafiği, Nichols grafiği ve diğer araçlar kullanılarak frekans alanındaki performansları ve sağlamlıkları açısından analiz edilebilir. Frekans alanında, geçici tepki bant genişliği ve rezonans frekansı özellikleri açısından analiz edilebilir; kararlı durum davranışı düşük frekans kazancı açısından analiz edilir ve sağlamlık kazanç, faz ve zaman gecikmesi marjları açısından analiz edilir(McGovern and Cohen 2007). Geri besleme kontrol transfer fonksiyonları, performans ve sağlamlık arasında denge kuracak şekilde seçilebilir. Frekans alanı analizi, tepki hızı ve aşım açısından katı performans gereksinimlerinin, değişen veya bilinmeyen parametreler ve bozulmaların varlığında sağlamlık gereksinimlerinin ve titreşimli sistem modlarının varlığı nedeniyle kontrol bant genişliğini sınırlama gereksinimlerinin bulunduğu uçak kontrolü de dahil olmak üzere birçok

uygulama alanında oldukça gelişmiştir. Uçak kontrolünde, doğrusal sistem tasarımının güvenilirliği, uçuş kontrolörleri için kazanç planlamasına yol açmıştır. Bu da, uçuş zarfının öngörülen bölgelerinde garantili performans ve sağlamlığa sahip kontrolörlerin tasarlanmasına olanak tanır. Kazanç planlaması, kapsamlı ve pahalı rüzgar tüneli testleri kullanılarak elde edilen doğrusal modeller gerektirir.

Gain-Scheduling (Kazanç Çizelgeleme) yöntemi, doğrusal olmayan sistemlerin farklı çalışma noktalarında farklı kontrol kazançlarıyla yönetilmesini sağlayan bir stratejidir(Shamma 1988). Bu yaklaşımda sistem, belirli çalışma bölgelerinde lineerleştirilir ve her bölge için uygun bir kontrol kazancı atanır(Shamma and Athans 1988). Kararlılık analizinde Lyapunov fonksiyonları genellikle parametrik sürekliliği sağlayan biçimde tasarlanır. Shamma ve Athans (1992) tarafından yapılan çalışmalar, uygun şekilde çizelgelenmiş kazançların sürekliliği sağlandığında sistemin genel kararlılığının Lyapunov kriteriyle garanti edilebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, kazanç geçişlerinde süresizlik veya modelleme hataları sistemin geçici kararlılığını olumsuz etkileyebilir(Ilka 2015).

Kazanç çizelgeleme, çeşitli kontrol sistemlerinin tasarımında başarıyla kullanılmaktadır. Kontrolörlerin kazanç çizelgeleme tekniğiyle tasarlandığı çok sayıda sistem örneği vardır. Örneğin, Stein ve arkadaşları, Stein ve Gangsaas ve arkadaşları, uçak ve uçuş kontrol sistemleri için kazanç çizelgelenmeli kontrolörlerin tasarımını ele almışlardır. Sain ve Peczkowski, doğrusal olmayan turbojet motorlarını ele almış ve motor hızına göre çizelgelenen kontrolörler tasarlamışlardır. Astrom ve Wittenmark, gemi dümeni, asitli atıkların pH kontrolü, yanma kontrolü, bir araba motorunda yakıt-hava kontrolü vb. gibi birçok farklı sistem için kazanç çizelgeleme yoluyla kontrolör tasarımına örnekler vermişlerdir. Kazanç çizelgeleme, çeşitli kontrol sistemlerinin tasarımında başarıyla uygulansa da, kazanç çizelgelemesine dayalı kesin olarak gerekçelendirilmiş algoritmalar bulunmamaktadır. Kazanç planlama tekniğiyle tasarım için sağlam bir teoremin olmaması, kazanç planlamalı sistemlerin güvenilirliğini zayıflatma eğilimindedir. Kazanç planlama tasarım araçları çoğunlukla sezgisel tasarım yönergeleridir; örneğin, "denetleyicilerin tasarlandığı çalışma noktası sayısı ne kadar fazlaysa, genel kazanç planlamalı sistem o kadar iyidir" veya "güvenilir bir kazanç planlamalı sisteme sahip olmak için, denetleyicilerin planlandığı parametreler sistem dinamiklerine kıyasla yavaş değişmelidir". Bu yönergeler ve kapsamlı bilgisayar simülasyonları, kazanç planlamalı kontrol sistemlerinin tasarımı ve etkinliğinin doğrulanmasının araçları olmuştur. Şu anda, kazanç planlamalı sistemlerin mevcut analizleri ve tasarım teknikleri, güvenilir ve pratik tasarım algoritmalarına yol açmamaktadır. Bu makalede, doğrusal MIMO parametrelili sistemler için kazanç planlama tekniğini kullanarak denetleyici tasarımını inceliyor ve hesaplama açısından verimli tasarım algoritmaları sunuyoruz. Doğrusal MIMO parametrelili sistemler, çeşitli kontrol sistemlerinin analiz ve tasarımında ortaya çıkar. Araştırmacılar doğrusal parametrelili sistemler için denetleyici tasarımını incelemiş olsalar da, bildiğimiz kadarıyla kazanç planlamasına dayalı, kesin olarak gerekçelendirilmiş ve pratik tasarım prosedürleri bulunmamaktadır. Bu makalenin organizasyonu aşağıdaki gibidir. 2. Bölüm'de sistemi tanıttırıyor ve ele alınan problemi ortaya koyuyoruz. 3. Bölüm'de, durum geri beslemeli kontrol yasasının sisteme uygulanmasını ele alıyor ve durum geri beslemeli kazanç matrislerinin planlamasını ayrıntılı olarak inceliyoruz. Kazanç planlamasına dayalı denetleyici tasarımı için algoritmalar öneriyoruz.

Modelden Bağımsız Uyarlanabilir Kontrol, sistem dinamiklerinin açık biçimde bilinmediği veya kapsamlı biriminin zor olduğu genişletilmiş bir yöntemdir. Hou ve Wang (2013) tarafından önerilen bu yaklaşım, giriş-çıkış bölümleri kullanılarak veri odaklı bir kontrol yasası oluşturur[40]. MFAC'te Lyapunov analizi, doğrudan sistem modeline değil, veri kişisel fark denklemleri üzerinden uzakta.

Böylece, sistemin kararlılığı ölçüm verileriyle ayrıştırılarak genelleştirilmiş hata süreleri incelenir[41]. MFAC, özellikle karmaşık, yüksek dereceli veya belirsiz sistemlerde uygulanabilirliğiyle dikkat çeker. Literatürde kaydedilen, tüm bu tedavilerin Lyapunov teorisiyle desteklendiği görülmektedir. MRAC ve L1-Adaptive yöntemleri klasik Lyapunov tedavisini doğrudan çalıştırırken, Gain- Scheduling ve MFAC yöntemleri parametre değişimlerine duyarlı genelleştirilmiş Lyapunov terapileri modunda. MRAC basit ve analitik olarak güçlü bir yapıya sahipken, L1-Adaptif Kontrol yüksek hız ve sağlamlık avantajı sunar. Kazanç-Planlama, doğrusal olmayan sistemlerde pratik çözümler sağlar, MFAC ise eklentiyi ortadan kaldırır. Ancak

bu yöntemlerin geneli, sistem belirsizliği, gürültü ve dijital uygulama koşulları farklı performans özellikleri göstermektedir.

YÖNTEMLER

MRAC – Model Reference Adaptive Control

MRAC tasarımında amaç, kontrol edilen sistemin çıktısının belirlenen bir referans modelin çıktısını takip etmesidir. Bunun için öncelikle: $e(t)=y(t)-y_m(t)$ şeklinde izleme hatası tanımlanır.

Uyarlamalı denetimde Lyapunov fonksiyonu, hem izleme hatasını hem de parametre uyarlama hatasını içerecek şekilde seçilir. Genellikle kullanılan Lyapunov fonksiyonu:

$$V(e,Q) = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2\gamma} q^t$$

Burada:

- e : izleme hatası
- $\theta \sim \theta - \theta$: gerçek parametre ile tahmin edilen parametre arasındaki fark
- $\gamma > 0$ \gamma > 0 \gamma > 0: uyarlama kazancı

Sistemi referans modele yaklaştırmak için ayarlanabilir parametreler şu uyarlama yasasına göre güncellenir: $\dot{\theta} = -\gamma e \cdot x$

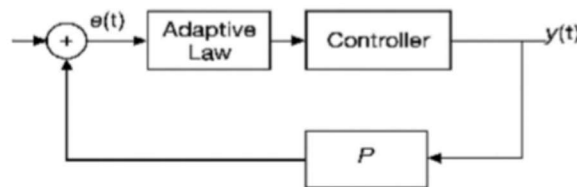
Burada:

- x : sistem durumu (veya regresör vektörü)
- γ \gamma \gamma: pozitif uyarlama kazancı
- e : izleme hatası

Bu denklem “gradient descent” (gradyan inişi) benzeri bir uyarlama kuralıdır; izleme hatası büyüdüğünde parametre daha hızlı güncellenir.

MRAC’ın Lyapunov bazlı kararlılık analizi üç temel şart içerir:

L1-Adaptive



Şekil 2. L1-Adaptive Blok Diyagramı

- Lyapunov fonksiyonunun pozitif tanımlı olması:

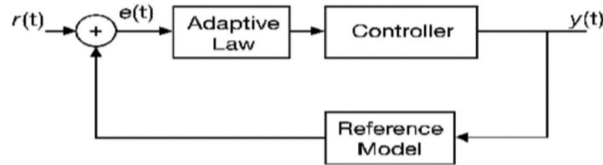
$$V = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2\gamma}Q^2 > 0$$

- Lyapunov türevinin negatif yarı tanımlı olması:
- Regressor vektörünün zenginlik şartı (persistent excitation – PE) Uyarlanan parametrelerin gerçek değerlere yakınsayabilmesi için:

$$\int_t^{t+T} \mathbf{x}(T) \mathbf{x}^T(T) dT \geq \sigma \mathbf{I}$$

- MRAC'ın Avantaj ve Dezavantajları

MRAC



Şekil 2. MRAC Blok Diyagramı

Avantajlar: Parametre belirsizliklerine karşı dayanıklıdır Sistem modelinin parametreleri tam bilinmese bile uyarlama yasası ile kontrol performansı korunur. Hızlı uyarlama yeteneğine sahiptir Hata büyüdükçe parametreler hızlı güncellenir. Uygulaması görece basittir Lyapunov tabanlı tasarım adımları matematiksel olarak nettir. Lineer sistemlerde güçlü teorik garantilere sahiptir Lyapunov fonksiyonu sayesinde global kararlılık kanıtlanabilir.

Dezavantajlar: Gürültüye karşı hassastır Uyarlama yasası türev içerdiği için sensör gürültüsü parametre güncellemelerini bozabilir. Hızlı uyarlama yüksek kontrol sinyali oluşturabilir Bu durum pratik sistemlerde (motor, aktüatör) zarar verici olabilir. Regressor zenginliği (PE) şartı her zaman sağlanmaz Bu durumda parametreler yanlış değerlere yakınsar. Nonlineer sistemlerde MRAC uygulaması karmaşıktır Lyapunov fonksiyonunu seçmek zorlaşır. Model belirsizliği yüksekse kontrol performansı düşebilir MRAC, nominal modele çok bağlı çalışır.

L1-Adaptive Control

L1-Adaptive Control, klasik MRAC (Model Reference Adaptive Control) yapısının filtrelenmiş

kontrol sinyali

kullanan özel bir versiyonudur. Temel blok diyagramı 3 ana bileşen içerir:

Şekil 2: L1-Adaptive blok
diyagramı Kritik bileşen:

- Control input $u(t)$, hızlı uyarlanan hatalı parametreler ile değil; bu hataları *low-pass filter* ile yumuşatılmış biçimde uygular. Bu, L1 yaklaşımını klasik MRAC'tan ayıran temel noktadır.
 - L1-Adaptive Control'de düşük geçiren filtre (genellikle 1. veya 2. dereceden) şu amaçla eklenir:
 - (a) Uyarlanan parametrelerin ani değişimlerinin bitkiye gitmesi engellenir
- MRAC'ta parametreler çok hızlı güncellenirse kontrol sinyali aşırı agresif olur kararsızlığa yol açabilir. L1 metodunda kontrol sinyali:

$$u(t) = C(s)Q(t)x(t)$$

Burada $C(s)$ düşük geçiren filtre.

(b) Kararlılık–performans ayrımı sağlanır

- Uyarlama hızı sistemin parametre belirsizliğini ne kadar hızlı öğrenir
- Filtre kontrolün ne kadar yumuşak

uygulanacağını belirler Bu sayede:

- Adaptation çok hızlı
- Control input yumuşak, stabilize edilmiş, sınırlı

(c) Yüksek frekanslı belirsizlikler filtrelendir

Gerçek sistemlerde:

- Ölçüm gürültüsü
- Yüksek frekanslı model hataları filtre sayesinde kontrol sinyaline yansımaz.

Hızlı Uyarlama Kararlılık Ayrımı (Fast Adaptation vs Robustness):Klasik uyarlamalı kontrol (MRAC, direct adaptive control) için önemli bir sınırlama vardır: Uyarlama hızını artırırsan, kararlılığı kaybedersin. Çünkü parametreler hızla değiştiğinde kontrol sinyali de hızlı salınır.

- L1-Adaptive Control'ün ana fikri şudur: Uyarlama kanalı ne kadar hızlı olursa olsun, kontrol sinyali filtre sayesinde sınırlı ve kararlı kalır.

Lyapunov Temelli Kanıtlar:

L1-adaptive Control Lyapunov analizine dayanır.

Temel fikir:

1. Tahmin hatası (parameter estimation error) için bir Lyapunov fonksiyonu tanımlanır:

$$V = Q^T T^{-1} Q$$

2. Uyarlama kuralı parametre hatalarını Lyapunov türevi negatif olacak şekilde seçilir:

$$Q = -T x(t) e(t)$$

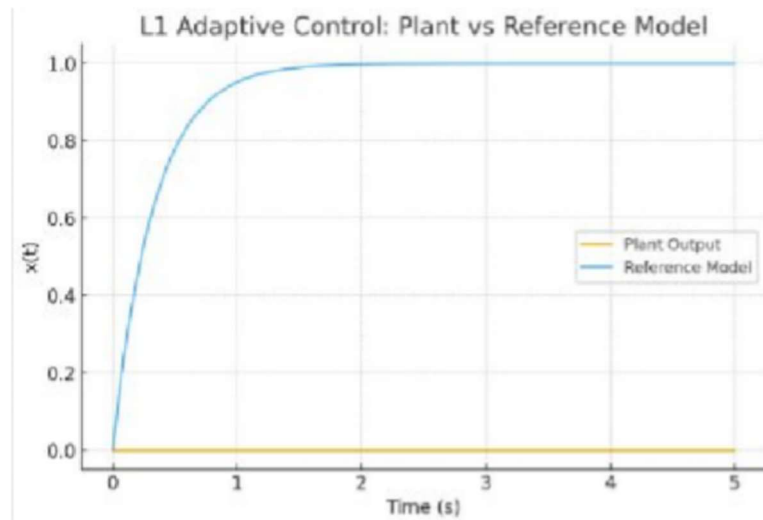
3. Bu parametreler kontrol sinyaline direkt verilmez, önce filtrelenir:

$$u(t) = C(s)Q(t)x(t)$$

4. Filtre sayesinde: bitkiye giden sinyal bounded (sınırlı) kapalı çevrim kararlı takip hatası sınırlı ve istenen üst sınırlar içinde kalır

Tablo1: MRAC ile L1-Adaptive Control Arasındaki Temel Farklar

Konu	MRAC	L1-Adaptive Control
Ana Fikir	Hata tabanlı direkt uyarlama	Hızlı adaptasyon+ filtrelenmiş kontrol
Kontrol Sinyali	Direkt uyarılan etkiye bağlı	LPF'den geçirilmiş
Adaptasyon Hızı	Sınırlı (kararlılık bozulur)	Çok hızlı olabilir
Kararlılık	Adaptasyon hızına bağlı	Filtre sayesinde garantili
Gürültü Hassasiyeti	Yüksek	Filtre ile düşük
Performans Analizi	Zordur	Tasarlanabilir(designable bounds)
Nonlinear Sistemlerde Davranış	Kimi zaman zayıf	Çok iyi performans
Esas Kullanım	Yumuşak sistemler	Zorunlu sistemler, uçak/uzay sistemleri



Şekil 3. L1 kontrollü bir sistem için Python simülasyonu

Kazanç planlama, çalışma noktasına (işletimsel olarak) göre kontrol kazançlarını genişletilmiş bir yöntem değişkenlik göstermeyen sistemlerde tek bir lineer kontrolör yeterli performans vermiyor; bunun yerine sistemin farklı çalışma noktalarında (veya değerlerinde) kesme modelleri çıkarılır, her birine uygun bir LTI (lineer-zaman- tekil) kontrolör tasarlanır ve gerçek zamanlı bu kazançlar planlama (zamanla veya durumla mevcut) değişkene göre seçilir veya enterpolasyonla çalıştırılır.

Doğru doğrusallaştırma noktaları seçimi performans ve geçiş davranışını doğrudan etkiler.

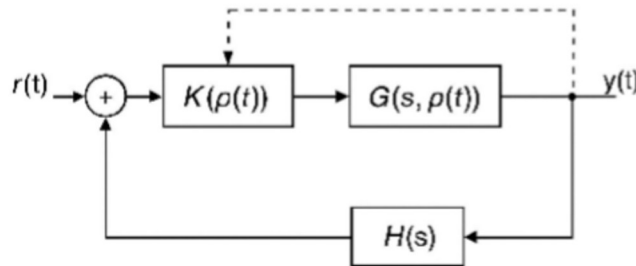
Pratik stratejiler:

1. Önemli işletim bölgelerini belirle: sistemin dinamiğinin hızlı değiştiği veya kontrol amaçlarının farklı olduğu bölgeler (ör. düşük/orta/yüksek hız).
2. Eşit hata/enerji tabanlı seçme: doğrusallaştırma noktalarını, sistemin tipik çalıştığı aralığı düzgün örtecek şekilde dağıt. (ör. uniform veya yoğunlaşma gereken bölgelere yoğun)
3. Kritik parametre değişimlerini yakala: nonlinearite kırılma noktaları mutlaka birer doğrusal nokta olsun.
4. Model doğruluğu kontrolü: her nokta için lineer modelin hatasını kontrol et; büyük hatalar gösteriyorsa daha fazla nokta ekle.
5. Parça-sayısı ile maliyet dengesi: fazla nokta kontrol ve geçiş karmaşıklığını artırır; az nokta performansı bozar.

Geçişler (switching, interpolation) dikkat edilmezse şunlar olabilir: performans bozulması, 'bumps' (ani kontrol atlaması), hatta geçici kararsızlık.

- Eğer tüm bölgesel linear kapalı çevrim sistemleri için ortak bir Lyapunov fonksiyonu $V(x)$ bulunabilirse, global (veya en azından tüm scheduling aralığı için) kararlılık garantilenir.
- Ortak V bulmak genelde zordur; LMI (Linear Matrix Inequality) tabanlı yöntemlerle aranır: Her mod $A_i - B_i K_i$ için bulunmalı. Eğer aynı P tüm i için sağlanıyorsa ortak Lyapunov var demektir.
- Daha esnek: $P(p)$ şeklinde $p - e$ bağlı bir Lyapunov fonksiyonu ararsın.
- LPV (Linear Parameter Varying) çerçevesinde, p -dereceli $P(p)$ polinom veya affine formda seçilip LMI ile çözülür.
- Bu yöntem genelde daha az muhafazakar sonuç verir ve global kararlılık sağlayabilir (şartlar sağlandığında).

Gain Scheduling Control



Şekil 4. Gain Scheduling kontrolcü yapısı blok diyagramı

■ Switch durumlarında her mod için ayrı $V_i(x)$ ve geçiş koşullarında V azalanlığını sağlayan ek koşullar (common decrease) aranır.

■ Dwell-time: mod değişimleri arasında belli minimum süre (dwell-time) şartı ile kararlılık sağlanabilir.

■ Eğer scheduling ağırlıklı enterpolasyon yapıyorsan, kapalı çevrim matrisleri sürekli değişir ve PD-Lyapunov uygundur.

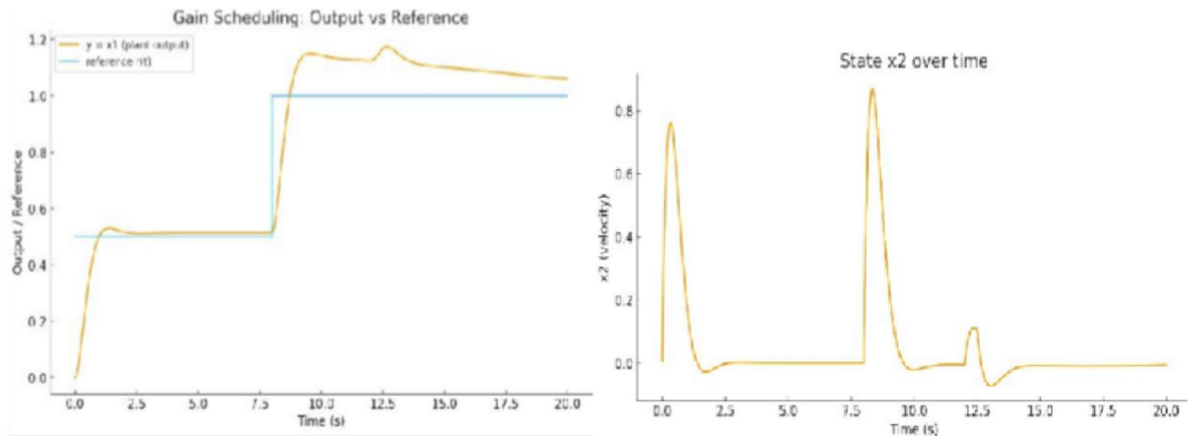
■ Eğer sert switching varsa, switched-systems teorisi uygulanır (Average dwell time, multiple Lyapunov vb).

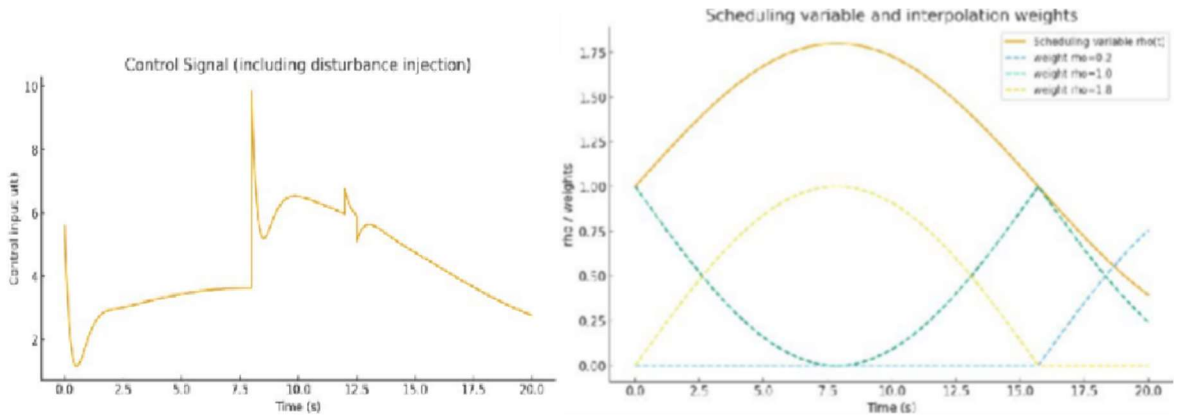
■ Gain scheduling: farklı işletim noktalarında farklı LTI kontrolörler + scheduling değişkenine göre seçme. Lineerleştirme noktalarını sistem dinamiğinin değiştiği, kritik bölgelerde yoğunlaştır; 3-7 nokta ile başla. Geçişlerde

bumpless transfer, enterpolasyon ve LPF kullan; sert switching riskli. Global Lyapunov garantisi zor; ortak Lyapunov bulunursa en iyi; bulunmazsa parameter-dependent Lyapunov (LPV) veya multiple Lyapunov/dwell-time yöntemleri kullan. Simülasyon ve worst-case testleri şart .

Gain Scheduling, doğrusal olmayan veya değişken parametrelili bir sistemin, farklı çalışma noktalarına göre farklı kontrolör kazançlarıyla yönetilmesini sağlar. Sistemin çalışma durumu bir scheduling variable ($p(t)$) ile izlenir:

- Açısal hız
 - Sıcaklık
 - Yakıt durumu
 - Uçuş hızı (uçaklarda en yaygını)
 - Tork
- Bu değişkene göre kontrolör kazancı: $K(p(t))$ seçilir.





Şekil 5. Gain Scheduling kontrolcüsünün Python simülasyonunu sonuçları

Model-Free Adaptive Control

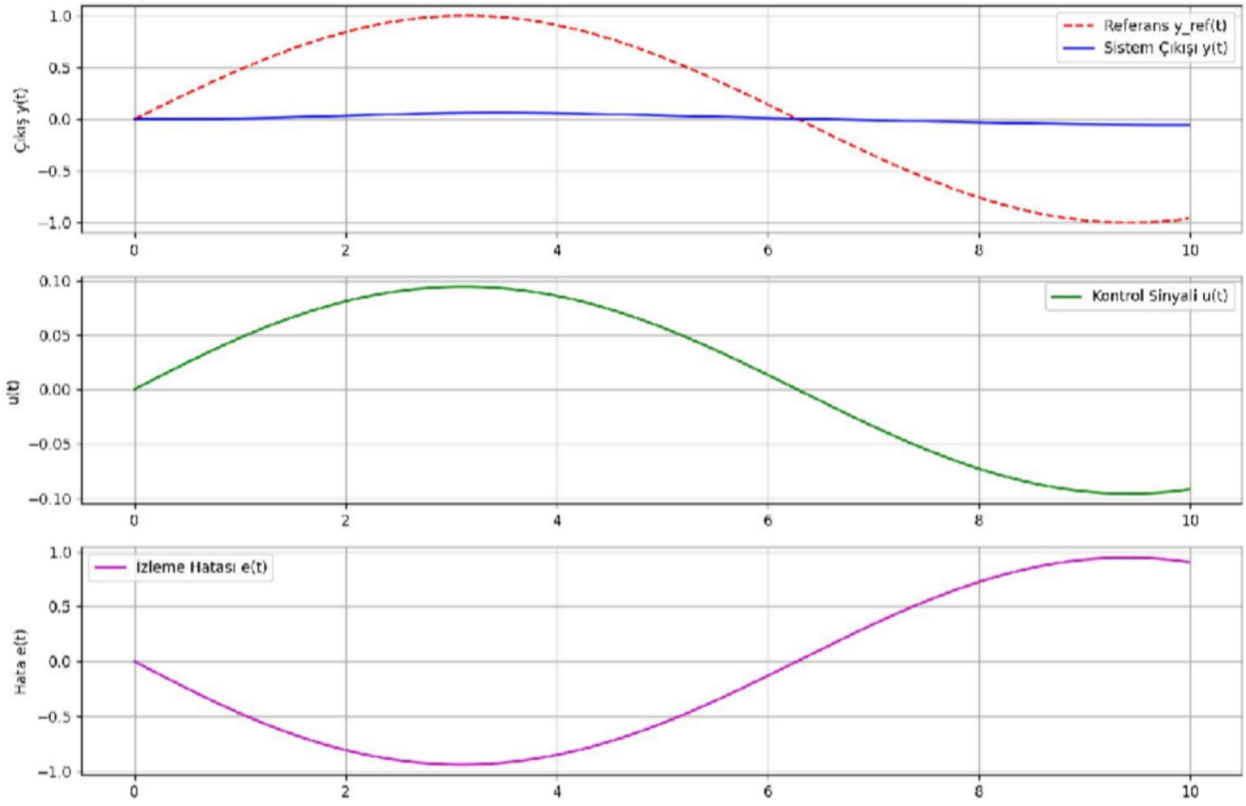
MFAC, sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymadan, yalnızca giriş çıkış verilerini kullanarak kontrolcü parametrelerini uyarlayan veri-temelli bir uyarlamalı kontrol yaklaşımıdır. En yaygın MFAC türü Dynamic Linearization Model (DLM) tabanlı MFAC'tır.

MFAC'ın çıkış noktası şudur: Sistemin modeli bilinmiyor olabilir, ancak yeterince sık örneklenen giriş çıkış verileri ile lokal bir lineerleştirme yapılabilir. Sistemin avantajları:

- Sistem modeli gerektirmez :Doğrusal, doğrusal olmayan, belirsiz, karmaşık sistemlerde çalışabilir.
- Hesaplama yükü düşüktür: Yalnızca birkaç temel güncelleme kuralı içerdiği için gerçek zamanlı sistemler için uygundur.
- Parametre uyarlama veriye dayalıdır: Güncelleme doğrudan ölçümlere dayanır.
- Çok iyi izleme performansı: Özellikle tek giriş-tek çıkış (SISO) sistemlerde referans takibi mükemmel olabilir.
- Yüksek belirsizlikte MRAC ve L1-Control'e alternatif Model bilinmediği durumlarda MRAC çalışmaz → MFAC çalışır.

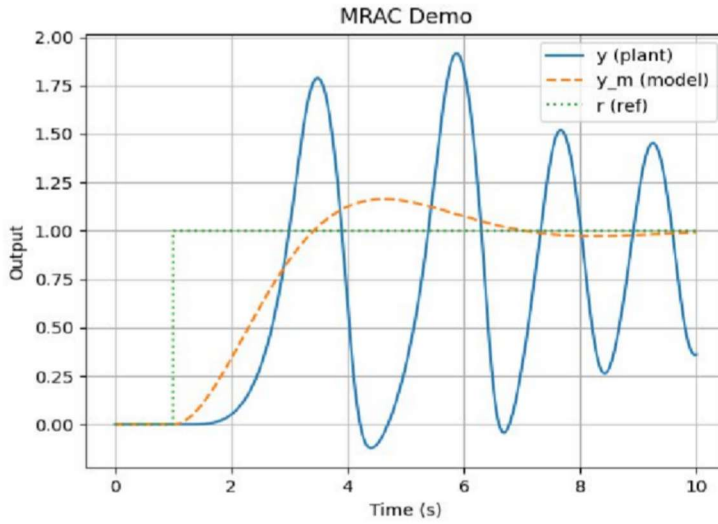
Dezavantajları :

- Ölçüm gürültüsüne aşırı duyarlıdır MFAC'ta türev benzeri bir parametre tahmini yapıldığında bu yapı gürültüden çok etkilenir.
- Çok küçük kontrol artırımlarında kararsızlık eğer $\Delta u(k)$ çok küçükse, aşağıdaki terim bozucu hale gelir çok küçük kontrol değişimleri sistemde büyük yalancı kazançlar üretir.
- Teorik sonuçlar genellikle lokal kararlılıktır MIMO sistemlere genişletilse de pratikte çok zor stabil tutulur.

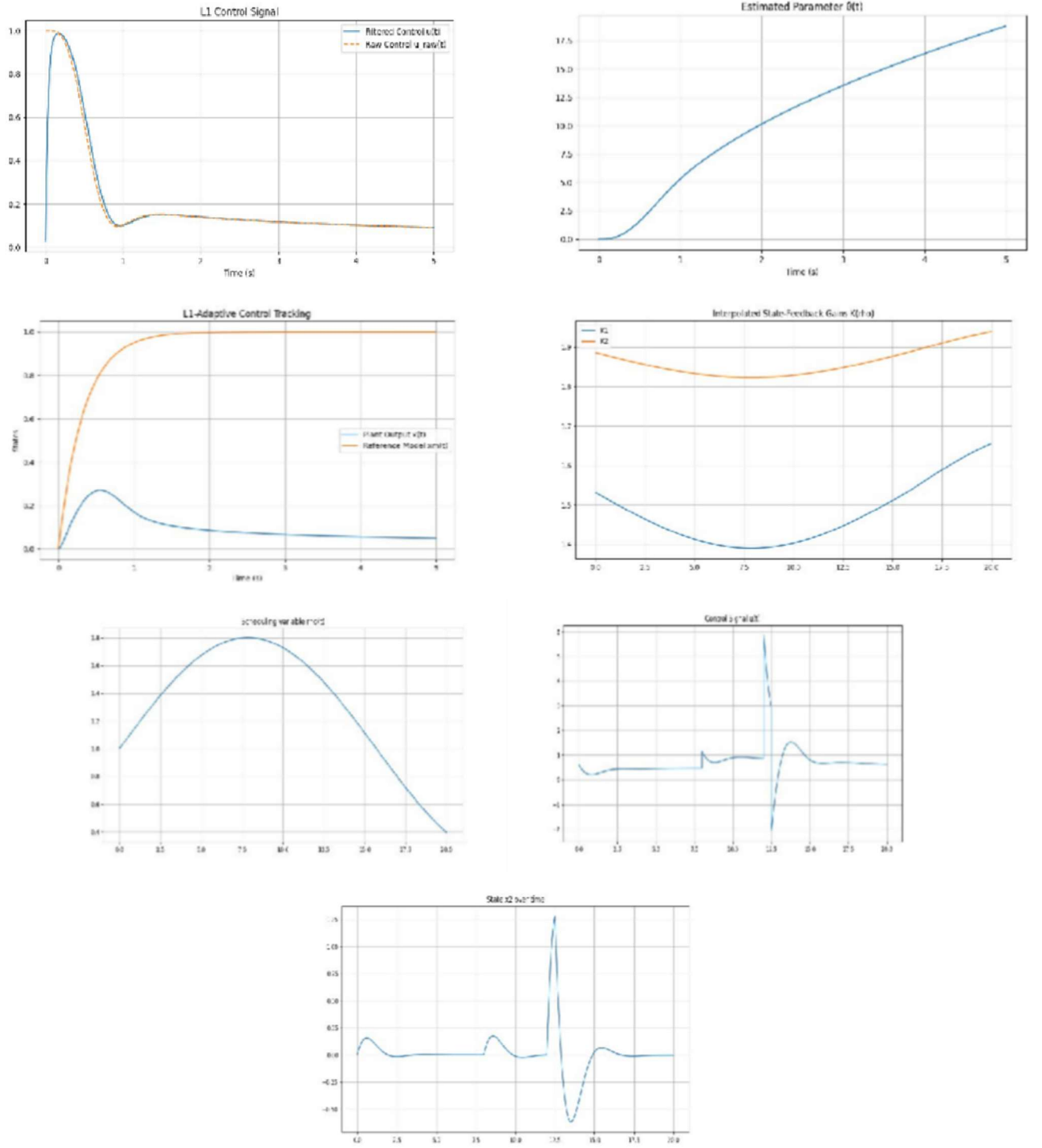


Şekil 6. MFAC simülasyonu grafiğini

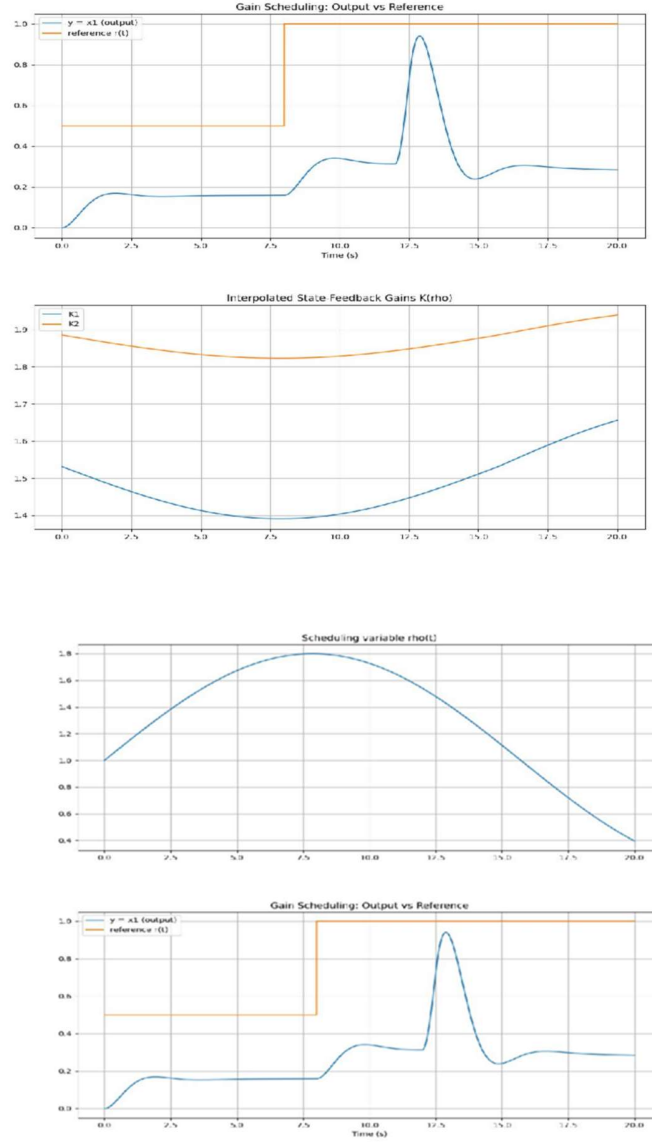
SONUÇ



Şekil 7. Model Reference Adaptive Control



Şekil 8. L1-Adaptive Control



Şekil 9. Gain Scheduling

TARTIŞMA ve GELECEK ÇALIŞMALAR

Uyurlamalı denetim yöntemleri farklı avantaj ve kısıtlamalara sahiptir. Yapılan simülasyonlar ve literatür incelemeleri:

- MRAC (Model Referansı Uyarlanabilir Kontrol):

Hızlı adaptasyon imkanına sahiptir ve referans modeli hızlı şekilde takip eder. Ancak adaptasyon agresif olduğunda kontrol sinyali dalgalı olabilir ve gürültüye hassastır. Bu nedenle parametre belirsizliği orta düzeyde ve giriş-çıkış ölçümleri güvenliyse tercih edilebilir.

- L1-Uyarlanabilir Kontrol:

Filtreleme oranları sayesinde daha kararlı ve düzgün kontrol oluşur. Kararlı performans göstergeleri sistemlerde, özellikle ölçülen ortamlar ve hassas uygulamalarda MRAC'a göre kazançtır.

- Kazanç Planlama:

Parametrelerin mevcut bilindiği veya rejimlerdeki değişim oranı etkilidir. Doğrusal olmayan veya sürekli döngülerde uygun set ve geçiş ile güçlü bir performans sağlar. Ancak geçiş bölgelerinde kararsızlık riski vardır.

- MFAC (Modelden Bağımsız Uyarlanabilir Kontrol):

Sistemin bireysel parçaları kalmaz ve sadece giriş çıkışları kullanır. Bu parçaların model belirsizliği yüksek sistemlerde çok kullanışlıdır. Dezavantaj olarak, gürültüye hassas ve teorik kararlılık garantisi MRAC/L1 kadar güçlü değildir.

Bu yöntemlerin kullanımı sırasında dikkat edilmesi gereken sınırlamalar:

- Parametre Tahmin Hataları: Uyarlamalı kontrol algoritmaları gerçek parametreleri tahmin etmeye çalışır; yetersiz veri veya PE (Persistent Excitation) koşulu sağlanmazsa parametreler yanlış yakınsamalar gösterebilir.
- Gürültü Etkisi: MRAC ve MFAC gibi yöntemler türev ve hata tabanlı uyarlamalar içerdiği için sensör gürültüsü kontrol performansını bozabilir.
- Zaman Gecikmeleri: Kontrol ve sensör gecikmeleri, hızlı adaptif algoritmalarda çıkış dalgalanmalarına yol açabilir.
- Nonlineer Dinamikler: Linear tabanlı adaptif kontrol algoritmaları, güçlü nonlineer sistemlerde kararlılık ve performans garantisi sağlamakta yetersiz kalabilir.

Uyarlamalı denetim araştırmalarında önümüzdeki dönemde yapılabilecek geliştirmeler:

- Veri Odaklı L1-Adaptive: L1-Adaptive algoritmaların veri odaklı versiyonları geliştirilerek model belirsizliği azaltılabilir.
- Derin Öğrenme Tabanlı MFAC: MFAC algoritmalarını derin öğrenme tabanlı tahmin ve kontrol yöntemleri ile birleştirerek adaptasyon hızını ve doğruluğunu artırmak mümkün.
- Robust MRAC Tasarımları: Parametre belirsizlikleri ve dış etkiler karşısında daha dayanıklı MRAC versiyonları araştırılabilir.
- Zaman Gecikmeli L1-Adaptive Kontrol: L1-Adaptive algoritmalar, sistem gecikmelerine karşı optimize edilerek daha kararlı performans sağlayabilir.
- Yapay Zeka Tabanlı Uyarlama Yasaları: GPT veya diğer yapay zeka modelleri kullanılarak uyarlama yasaları ve kontrol parametreleri optimize edilebilir, gerçek zamanlı karar mekanizmaları geliştirilebilir.

KAYNAKÇA

- [1] S. Abd-Elhaleem, M. A. Hussien, M. Hamdy, and T. A. Mahmoud, "Event-triggered model-free adaptive control for nonlinear systems using intuitionistic fuzzy neural network: Simulation and experimental validation," *Complex & Intelligent Systems*, vol. 10, pp. 2271–2297, 2024.
- [2] F. Adıgüzel, K. Kurtuluş, and T. Türker, "A gain scheduling attitude controller with NN supervisor for quadrotor UAVs," *Int. J. Control, Autom. Syst.*, vol. 22, pp. 3777–3791, 2024.
- [3] H. Ahmadian, M. M. Arefi, A. Khayatian, and A. Montazeri, "An improved L1 adaptive high-gain observer with guaranteed performance and stability robustness for uncertain Euler–Lagrange systems," *Ocean Engineering*, vol. 311, Art. no. 118684, 2024.
- [4] C. E. Aoun, P. Zhao, H. Almubarak, N. Hovakimyan, and E. A. Theodorou, "L1 adaptive control of constrained systems using barrier states," in *AIAA SCITECH 2023 Forum*, 2023, p. 1051.
- [5] M. A. Arteaga and Y. Tang, "Adaptive control of robots with an improved transient performance," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 47, no. 7, pp. 1198–1202, 2002.
- [6] G. Bertolani, A. D. Ryals, E. L. de Angelis, L. Pollini, and F. Giuliatti, "L1 adaptive control for small-scale unmanned helicopters: Enhancing speed regulation," *Drones*, vol. 8, pp. 1–21, 2024.
- [7] C. Cao and N. Hovakimyan, "Design and analysis of a novel $\mathcal{L}_1$ adaptive control architecture with guaranteed transient performance," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 2, pp. 586–591, 2008.
- [8] J. Chandrasekhar and M. P. R. V. Rao, "Proportional + integral + double integral adaptive laws for Liapunov MRAC," in *Proc. 1982 American Control Conf.*, 1982, pp. 557–561.
- [9] A. Datta and M.-T. Ho, "On modifying model reference adaptive control schemes for performance improvement," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 39, no. 9, pp. 1977–1980, 1994.
- [10] A. Datta and P. A. Ioannou, "Performance analysis and improvement in model reference adaptive control," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 39, no. 12, pp. 2370–2387, 2002.
- [11] P. J. D. de Oliveira Evald, G. V. Hollweg, R. V. Tambara, and H. A. Gründling, "Lyapunov stability analysis of a robust model reference adaptive PI controller for systems with matched and unmatched dynamics," *J. Franklin Inst.*, vol. 359, pp. 6659–6689, 2022.
- [12] L.-C. Fu, "A new robust MRAC using variable structure design for relative degree two plants," *Automatica*, vol. 28, no. 5, pp. 911–925, 1992.
- [13] A. Gahlawat, P. Zhao, A. Patterson, N. Hovakimyan, and E. Theodorou, "L1-GP: L1 adaptive control with Bayesian learning," in *Learning for Dynamics and Control*, PMLR, 2020, pp. 826–837.
- [14] K. Gökece, *Dinamik Sistemlerin Eyleyici Arzalarının Model Referans Uyarlamalı Kontrol Yaklaşımı ile Kompanzasyonu*, Ph.D. dissertation, 2007.
- [15] I. Gregory, C. Cao, E. Xargay, N. Hovakimyan, and X. Zou, "L1 adaptive control design for NASA AirSTAR flight test vehicle," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf.*, 2009, p. 5738.
- [16] M. Heydari, S. Darvishpoor, A. B. Novinzadeh, and J. Roshanian, "On the performance of the model-free adaptive control for a novel moving-mass controlled flying robot," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 110, Art. no. 79, 2024.
- [17] N. Hovakimyan and C. Cao, *$\mathcal{L}_1$ Adaptive Control Theory: Guaranteed Robustness with Fast Adaptation*. Philadelphia, PA, USA: SIAM, 2010.
- [18] A. Ilka, *Gain-Scheduled Controller Design*. Bratislava, Slovakia: Institute of Robotics and Cybernetics, 2015.
- [19] S. E. Khelas, S. Ladaci, and Y. Bensafia, "State space model reference adaptive control for a class of second-degree fractional order systems with different eigenvalues," *Gazi Univ. J. Sci.*, vol. 37, pp. 1300–1307, 2024.
- [20] E. Lavretsky and K. A. Wise, *Robust and Adaptive Control with Output Feedback*. Springer, 2012.
- [21] Y. Li et al., "L1 adaptive structure-based nonlinear dynamic inversion control for aircraft with center of gravity variations," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 106, Art. no. 4, 2022.
- [22] R. Ma, X. Xia, and Y. Qu, "Model reference adaptive control for switched linear systems with uncertain parameters and its application in electro-hydraulic systems," *Int. J. Control, Autom. Syst.*, vol. 22, pp. 2990–2998, 2024.
- [23] S. M. McGovern and S. B. Cohen, "Survey of contemporary aircraft flight dynamics models for use in airspace simulation," in *Modeling and Simulation for Military Operations II*, SPIE, 2007, pp. 228–239.
- [24] P. Mukherjee et al., "Neural L1 adaptive control of vehicle lateral dynamics," *arXiv:2405.16358*, 2024.
- [25] H. L. T. Nguyen, "Lyapunov-based design of a model reference adaptive control for half-car active suspension systems," *J. Measurement, Control, and Automation*, vol. 5, pp. 22–29, 2024.
- [26] N. T. Nguyen, *Model-Reference Adaptive Control: A Primer*. Springer, 2018.

- [27] P. Parks, “Liapunov redesign of model reference adaptive control systems,” IEEE Trans. Autom. Control, vol. 11, no. 3, pp. 362–367, 1966.
- [28] M. P. R. V. Rao, “New design of model reference adaptive control systems,” J. Applying Mechanical Engineering, vol. 31, pp. 1–3, 2014.
- [29] S. Salighe and D. Söffker, “On the PID-structured model-free adaptive control: A comparison of different approaches,” in Proc. Eur. Control Conf. (ECC), 2024, pp. 1309–1314.
- [30] J. S. Shamma, Analysis and Design of Gain Scheduled Control Systems. MIT, 1988.
- [31] J. S. Shamma and M. Athans, “Analysis of gain scheduled control for linear parameter-varying plants,” 1988.
- [32] T. Souanef, “ $\mathcal{H}_\infty$ adaptive output feedback control of small unmanned aerial vehicles,” Unmanned Systems, vol. 11, pp. 249–260, 2023.
- [33] M. Sung et al., “Robust model-based reinforcement learning using L1 adaptive control,” in Int. Conf. on Learning Representations (ICLR), 2024.
- [34] T. Tarczewski, L. J. Niewiara, and L. M. Grzesiak, “Gain-scheduled state feedback speed control of synchronous reluctance motor,” in Proc. IEEE PEMC, 2021, pp. 559–565.
- [35] J. Wang, Y. Wang, and X. Gao, “Gain scheduling control for bipartite consensus of multi-agent systems with actuator saturation,” in Proc. Chinese Control Conf. (CCC), 2022, pp. 1095–1101.
- [36] J. Wang, S. Baldi, and H. J. van Waarde, “Bridging model reference adaptive control and data informativity,” arXiv:2502.21091, 2025.
- [37] Y. Wang, C. Shen, J. Huang, and H. Chen, “Model-free adaptive control for unmanned surface vessels: A literature review,” Systems Science & Control Engineering, vol. 12, Art. no. 2316170, 2024.
- [38] S. Waseem et al., “Expert and intelligent systems for robotic manipulators control: A comprehensive review,” Authorea Preprints, 2025.
- [39] Z. Zang and R. R. Bitmead, “Transient bounds for adaptive control systems,” in Proc. 29th IEEE Conf. Decision and Control, 1990, pp. 2724–27

OTONOM TESPİT ROBOTU İLE SAHA TARAMASI VE TEHDİT TESPİTİ

Livanur AK¹

Özet– Bu çalışma, savunma sanayisinde hızla gelişen teknolojilerle birlikte önem kazanan otonom sistemlerin saha taraması ve tehdit tespiti görevlerindeki rolünü ele almaktadır. İnsansız Kara Araçları (UGV) ve İnsansız Hava Araçları (UAV), yapay zekâ ve robotik sistemlerin entegrasyonu sayesinde karmaşık görevleri insan müdahalesi olmadan güvenilir ve etkin bir şekilde yerine getirebilmektedir. Çalışma kapsamında, otonom askeri robotların sistem mimarisi, çevresel algılamada kullanılan temel sensör teknolojileri (LiDAR, RADAR, GNSS/IMU), mayınlar (EO/UXO) ve KBRN unsurları gibi kritik tehdit türleri ve bu tehditlerin tespiti için yaygın olarak kullanılan yapay zekâ tabanlı yöntemler (YOLOv8, derin pekiştirmeli öğrenme) incelenmektedir. Ayrıca, robotların bağımsız hareket kabiliyetini sağlayan modern navigasyon ve hareket planlama algoritmaları (A*, RRT, DWA) ile UAV–UGV işbirliği yaklaşımları ve siber-fiziksel güvenlik bileşenleri de değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, otonom sistemlerin geleceğin savunma doktrinlerinde kritik bir bileşen haline geldiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler –Otonom Tespit Robotu; Çoklu Sensör Füzyonu; Tehdit Tespiti; SLAM; LiDAR (Lazer Tarama Sensörü); EO/IR Kamera; Radar Sensörü, GNSS/IMU; Otonom Seyir; Saha Taraması

GİRİŞ

Günümüz savunma teknolojilerinde otonom sistemler; keşif, saha taraması ve tehdit tespiti gibi kritik görevlerde insan riskini azaltması ve yüksek operasyonel verim sağlaması nedeniyle stratejik önem kazanmıştır. [1] İnsansız Kara Araçları (UGV) ve İnsansız Hava Araçları (UAV), yapay zekâ, robotik ve sensör füzyonu alanındaki ilerlemeler sayesinde keşif, saha taraması, tehdit tespiti ve tehlikeli bölgelerde operasyon yürütme gibi karmaşık görevleri bağımsız biçimde yerine getirebilmektedir. Özellikle mayınlar, patlamamış mühimmat (EO/UXO) ve KBRN (Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik, Nükleer) tehditleri gibi yüksek riskli unsurların bulunduğu bölgelerde, otonom sistemlerin kullanımı hem operasyonel etkinliği artırmakta hem de personel güvenliğini sağlamaktadır.[2]

Otonom tespit robotlarının en kritik bileşenlerinden biri çevresel algılama ve konumlama altyapısıdır. Modern sistemler; LiDAR, RADAR, EO/IR kameralar, GNSS/IMU birimleri, akustik diziler ve gerektiğinde kimyasal sensörlerden elde edilen verileri bir arada kullanarak yüksek hassasiyetli durum farkındalığı üretir. Bu çoklu sensörlerden gelen veri akışı, Sensör Füzyonu algoritmaları ile birleştirilir; böylece tek bir sensörün sınırlamalarının ötesine geçilerek daha güvenilir bir çevresel model oluşturulur. Bu kapsamda, son yıllarda geliştirilen otonom tespit robotları çevresel verileri yüksek hassasiyetle toplamaktadır. Bu veriler, nesne algılama algoritmaları (YOLOv8, RetinaNet), derin öğrenme tabanlı sınıflandırıcılar ve pekiştirmeli öğrenme tabanlı hareket karar mekanizmaları ile işlenerek tehdit türlerinin tanımlanması, konumlandırılması ve risk seviyesinin belirlenmesine imkân sağlamaktadır.[3-6]

Ek olarak, çoklu robot işbirliği düşüncesi çerçevesinde UAV–UGV koordinasyonu, geniş alanların daha hızlı ve etkili şekilde taranmasını sağlayarak görev başarımını önemli ölçüde artırmaktadır.[7]

Bu çalışma, otonom tespit robotlarının sensör mimarisi, tehdit algılama algoritmaları, navigasyon altyapısı ve işbirlikçi hareket stratejilerini inceleyerek savunma alanındaki mevcut yaklaşımları değerlendirmekte ve modern tehdit ortamlarında otonom sistemlerin etkin kullanımına ilişkin kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır.

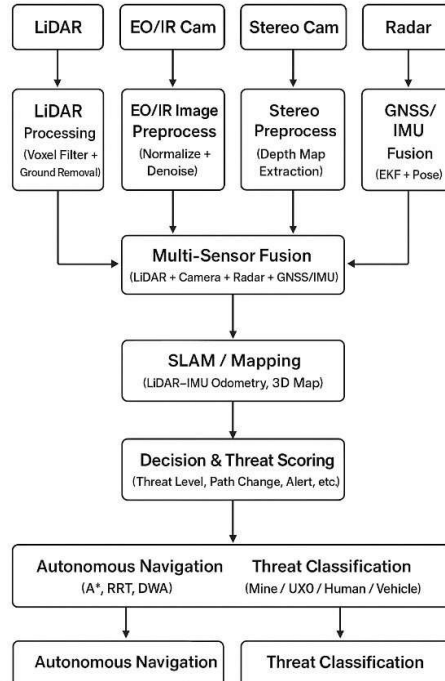
MATERYALLER VE YÖNTEM

Bu çalışmada, askeri ve güvenlik odaklı uygulamalarda kullanılan otonom mobil robotların gerçek saha

koşullarında tehdit tespiti yapabilmesi amacıyla bir deney düzeneği kurulması düşünülmüş ve çoklu sensör füzyonuna dayalı bir tespit sistemi tasarlanmıştır. Robotun farklı arazi ve çevresel koşullarda güvenilir çalışabilmesi için hem donanımsal sensör mimarisi hem de yazılımsal SLAM-algılama algoritmaları gerçek zamanlı çalışacak şekilde bir araya getirilmiştir. Sistemin tasarımında maliyetin düşük tutulması, ticari bileşenlerin uyumlu biçimde birleştirilebilmesi ve farklı robot platformlarında yeniden kullanılabilir olması hedeflenmiştir.

Deneysel Sistem Tasarımı

Kurulacak otonom tespit robotu; LiDAR, stereo kamera, EO/IR kamera, radar sensörü, GNSS/IMU birimi, gaz sensörleri, yerleşik bilgisayar ve kablosuz haberleşme modüllerinden oluşan çok modlu bir algılama yapısına sahiptir. Sistem şematik olarak Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Otonom robot sensör mimarisi

Sensör Entegrasyonu ve Veri Toplama

Robotun çevresel algılama görevinde kullanılması planlanan tüm sensörlerin fiziksel yerleşimi ve bağlantı yapısının Şekil 1’de gösterilmektedir. Bu kapsamda;

- LiDAR, üç boyutlu engel tespiti ve gerçek zamanlı SLAM haritalaması için,
- Stereo/EO kamera, YOLOv8 tabanlı görsel tehdit tespiti ve sınıflandırma amacıyla,
- IR kamera, düşük ışık ve gece operasyonlarında termal imza analizi için,
- Radar, sis, toz ve duman gibi düşük görüş koşullarında hareketli hedeflerin tespiti için,
- GNSS/IMU, robotun konum, hız ve yönelim bilgisinin kararlı şekilde belirlenmesi için,
- Gaz/Kimya sensörleri, KBRN (Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer) tehditlerin algılanmasına yönelik olarak (Şekil 1’de gösterilmemesine rağmen sistem tasarımında dahil edilmesi düşünülmektedir),
- UWB/5G modem, UGV-UAV arasında düşük gecikmeli iletişim ve konum paylaşımı sağlamak amacıyla kullanılmak üzere seçilmiştir.

Bu multisensör yapının eşzamanlı çalışması için verilerin ortak bir zaman damgası (timestamp) ile hizalanması planlanmış olup, yüksek bant genişlikli veri işleme ihtiyacını karşılamak adına robot üzerinde NVIDIA Jetson Xavier tabanlı bir gömülü bilgisayar kullanılması tasarlanmıştır. Ön işleme, sensör füzyonu, SLAM ve tehdit tespit algoritmalarının da bu platform üzerinde çalıştırılması öngörülmektedir.

Arazi Testi ve Senaryo Tasarımı

Sistemin performansını değerlendirebilmek için farklı arazi koşullarını kapsayan bir saha deney protokolü uygulanır. Test senaryoları:

- Düz zemin taraması
- Yüksek/orta engelli arazi
- Dar geçitler ve kapalı koridorlar
- Düşük ışık koşulları
- Sis, duman, toz simülasyonu
- Sabit tehdit (şüpheli paket, mayın, UXO)
- Hareketli tehdit (insan, araç, mobil hedef)
- Kimyasal sensör için gaz salınım deneyleri

Her senaryo en az 5 tekrarla yürütülmek istenmektedir, robotun navigasyon kararlılığı, algılama doğruluğu ve SLAM stabilitesi kaydedilecektir.

Sensör Füzyonu ve Ön İşleme

Sistemin tehdit tespiti görevini yerine getirebilmesi için, tüm sensörlerden elde edilen ham verilerin işlenebilir hâle getirilmesi ve birlikte yorumlanması gerekmektedir. Bu kapsamda, öncelikle her sensör türü için özel ön işleme adımlarının uygulanması öngörülmektedir. LiDAR verileri, sistemde kullanılacak SLAM ve 3D çevre algılama modüllerinin hassas çalışabilmesi için nokta bulutu kümelendirme işlemlerinden geçirilecektir. EO ve IR kameralar sistemin görsel tehdit algılama kapasitesinin temelini oluşturduğundan, görüntülerin gürültüden arındırılması ve model girişine uygun hâle getirilmesi kritik önem taşır. EO/IR kamera verilerinde ise tehdit tespit algoritmalarının daha kararlı çalışmasını sağlamak amacıyla gürültü azaltma, histogram dengeleme, görüntü normalizasyonu ve çeşitli veri artırma (rotation, flip, brightness shift) tekniklerinin uygulanması planlanmaktadır. Radar verilerinin işlenmesinde range-Doppler haritaları, mikro-Doppler spektral çıkartımı ve spektral gürültü filtreleme yöntemleri kullanılacak; GNSS-IMU verileri ise konum ve yönelim bilgisinin kararlı hâle getirilmesi için Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) ile birleştirilecek ve oluşabilecek sapmaların azaltılması amacıyla LiDAR geri beslemesiyle desteklenecektir.

Ön işleme adımlarının ardından tehdit tespit modülleri devreye girecek şekilde bir tasarım yapılmıştır. Görsel tehditlerin (şüpheli paketler, kişiler, araçlar, mayın/UXO vb.) tespit edilmesi amacıyla YOLOv8 tabanlı bir görüntü işleme modeli kullanılacak; bu modelin, transfer learning yaklaşımı ve veri artırma teknikleriyle yaklaşık 2000 etiketli veri üzerinde eğitilmesi öngörülmektedir.

YOLOv8 Tabanlı Bir Sistemin Temel Bileşenleri;

1. Giriş Veri Kaynağı

Sistem, bir kameradan (EO kamera, IR kamera, stereo kamera) alınan görüntüleri modele iletir.

2. Ön İşleme

- Görüntü yeniden boyutlandırılır (genellikle 640×640).
- Normalizasyon uygulanır.
- Gürültü azaltma ve görüntü iyileştirme yapılır.

3. YOLOv8 Modeli

Model görüntü üzerinde aşağıdaki işlemleri yapar:

- Nesne tespiti: “Bu görüntüde ne var?”
- Sınıflandırma: “Bu nesne hangi sınıfa ait?”

- Bounding-box çıkarımı: “Nesne görüntünün neresinde?”
- Segmentasyon (opsiyonel): Nesnenin sınırlarını piksel olarak çıkarma.

YOLOv8’in avantajı tek geçişte (You Only Look Once) hızlı ve gerçek zamanlı tespit yapar.

Radar ve LiDAR sensörlerinin birlikte değerlendirilmesi ise özellikle düşük görüş koşullarında kritik rol oynayacaktır; bu amaçla radarın Doppler bilgisi, LiDAR nokta bulutu kümeleri ile birleştirilerek hareketli hedeflerin sağlam ve kararlı şekilde tespit edilmesi hedeflenmektedir. KBRN tehditleri için tasarlanan gaz sensörü modülünde ise eşik tabanlı bir anomali algılama sistemi kullanılacak ve ortamda ani gaz artışları uyarı olarak işlenecektir.

Robotun otonom hareket edebilmesi için navigasyon ve rota planlama sisteminin de bütünsel bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu doğrultuda, robotun bilinmeyen bölgelerde haritalama yapabilmesi amacıyla LiDAR-IMU tabanlı LOAM SLAM algoritması kullanılacak; küresel rota planlama için A* algoritması (küresel rota planlayıcı), dinamik engellerden kaçınmak için ise DWA (Dynamic Window Approach) (yerel engel kaçınma algoritması) tercih edilecektir.

Çoklu robot görevlerinde UGV-UAV koordinasyonunun sağlanabilmesi için UWB tabanlı konum paylaşımı ve eş zamanlı harita birleştirme yaklaşımının uygulanması planlanmaktadır. Bu bütünlük yapı sayesinde robotun hem bilinmeyen ortamlarda harita çıkarabilmesi hem de algıladığı tehditlere karşı güvenli ve verimli bir rotayı otomatik olarak oluşturabilmesi hedeflenmektedir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma, saha taraması ve tehdit tespiti görevlerinde otonom tespit robotlarının performansını artırmak amacıyla çoklu sensör füzyonuna dayalı bir sistemin tasarımını ve deneysel uygulamasını sunmaktadır. Kurulan sistem, LiDAR, EO/IR kamera, radar, GNSS/IMU ve gaz sensörleri gibi farklı sensörleri entegre ederek hem sabit hem de hareketli tehditleri farklı çevresel koşullarda tespit edebilmektedir. Sensörlerden elde edilen verilerin ön işleme ve füzyon süreçleri sayesinde tek bir sensöre bağımlı kalınmadan daha güvenilir ve doğru çevresel bilgi sağlanmıştır.

Deneysel prototip, düz zemin, engebeli arazi, dar geçitler, düşük ışık ve sisli koşullar gibi çeşitli senaryolarda test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, LiDAR ve radar entegrasyonunun özellikle düşük görüş koşullarında hareketli hedef tespitinde kritik bir rol oynadığını, EO/IR kameraların ise görsel tehditlerin tanınmasında yüksek doğruluk sağladığını göstermiştir. GNSS-IMU ve SLAM tabanlı navigasyon sistemi, robotun bilinmeyen ortamlarda haritalama yapabilmesini ve güvenli rota planlamasını mümkün kılmıştır. KBRN sensörleri ile gerçekleştirilen gaz algılama modülü, anomali tabanlı uyarılar ile çevresel tehditlerin hızlı şekilde tanımlanmasını sağlamıştır.

Sonuç olarak, tasarlanan çoklu sensörlü sistem, farklı arazi ve çevre koşullarında otonom robotun hem saha taraması hem de tehdit tespit görevlerini güvenilir ve etkin biçimde yerine getirmesine imkân tanımaktadır. Sistem, düşük maliyetli, modüler ve farklı robot platformlarına uyarlanabilir bir altyapı sunmaktadır. Bu çalışma, otonom robotların değişken çevresel koşullarda performansını değerlendirmek ve gelecekte çoklu robot işbirliği ile görev başarımını artırmak için bir temel oluşturacaktır.

KAYNAKÇA

- [2] J. Reis, Y. Cohen, N. Melao, J. Costa, and D. Jorge, "High-tech defense industries: Developing autonomous intelligent systems," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, p. 4920, 2021.
- [3] H. Lee, J. Yoon, M.-S. Jang, and K.-J. Park, "A robot operating system framework for secure uav communications," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1369, 2021.
- [4] O. Liu, S. Yuan, and Z. Li, "A survey on sensor technologies for unmanned ground vehicles," in *2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*, 2020: IEEE, pp. 638–645.
- [5] E. Vivoli, M. Bertini, and L. Capineri, "Deep learning-based real-time detection of surface landmines using optical imaging," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 4, p. 677, 2024.

- [6] M.-M. Gurgu, J. P. Queralta, and T. Westerlund, "Vision-based gnss-free localization for uavs in the wild," in *2022 7th International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (ICMERR)*, 2022: IEEE, pp. 7–12.
- [7] J. Zhang, X. Na, R. Xi, Y. Sun, and Y. He, "mmHawkeye: Passive UAV detection with a COTS mmWave radar," in *2023 20th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*, 2023: IEEE, pp. 267–275.
- [8] L. Zheng, M. Wei, R. Mei, K. Xu, J. Huang, and H. Cheng, "AAGE: Air-Assisted Ground Robotic Autonomous Exploration in Large-Scale Unknown Environments," *IEEE Transactions on Robotics*, 2025.

OTONOM KARA TAŞITLARINDA ELEKTRİKLİ TAHRİK VE YAZILIM ENTEGRASYONU: ENERJİ YÖNETİMİ, YÜKSEK GÜÇLÜ SENSÖRLER VE KOMUTA-KONTROL SİSTEMLERİ

IBRAHİM MOHAMMED ABDULWAHHAB ALHURIYA *

¹Department of Electric Electronic Engineering, Selçuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya

**(ibrahimalhuriya@gmail.com)*

Özet – Bu çalışma, hibrit elektrikli tahrik, yüksek güçlü sensörler ve entegre komuta, kontrol, haberleşme, istihbarat, gözetleme ve keşif (C4ISR/C2) sistemleri bağlamında enerji yönetim sistemleri mimarisinin bir karar destek süreci üzerinden nasıl ele alınabileceğini incelemeyi amaçlamaktadır. Teknik açıdan araştırma, kendinden tahrikli ve yarı kendinden tahrikli askeri kara platformları için elektrikli tahrik sistemleri ile yazılım altyapılarının entegrasyonunu ele almaktadır. Bulgular, elektrikli tahrik sistemlerinin yüksek verimlilik, sessiz çalışma ve araç üzerinde yedek güç sağlama gibi önemli avantajlar sunduğunu; buna karşılık batarya enerji yoğunluğu ve şarj altyapısına ilişkin sınırlamalarla karşılaştığını göstermektedir.

FNSS KAPLAN HYBRID, RHEINMETALL, MISSION MASTER ve MILREM THEMIS gibi araç örnekleri incelenmiş; sistem blok diyagramları, kontrol algoritmaları ve mimari tasarımlar literatür taraması ve platform model analizi yoluyla değerlendirilerek ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Bu entegrasyon kapsamında, veri-yoğun haberleşme, güç yönetimi ve algoritmik karmaşıklık gibi alanlarda mühendislik gereksinimleri belirlenmiştir. Ayrıca gelişmiş bataryalar, yakıt hücreleri ve artan otonomi teknolojilerinin geleceğine yönelik araştırma-geliştirme başlıkları ele alınmıştır. Yazılım perspektifinden bakıldığında ise NGVA, VICTORY ve FACE/SOSA gibi açık mimarilerin, yapay zekâ destekli karar verme birimleri ile birlikte sensör verilerinin etkin kullanımını ve muharebe bilgilerinin gelişmiş durumsal farkındalığa dönüştürülmesini mümkün kıldığı ortaya konmuştur.

***Anahtar Kelimeler** – Otonom kara platformları, elektrikli tahrik sistemleri, komuta ve kontrol (C4ISR), yapay zekâ, enerji yönetimi, sensör füzyonu.*

GİRİŞ

Keşif ve etkileşim etkinliğini artırmada öncelikli olan teknoloji, insansız kara araçlarına (İKA) ve yarı otonom platformlara yerleştirilmekte veya monte edilmekte, ayrıca silahlı kuvvetlerin muharebe sahasındaki güvenliğini artırmaktadır.[1]. Bu araçlar, yapay zekâ ve uzaktan kumandayı kullanarak sürücü yerine sahadaki tehditlere hızlı tepki verebilme ve tespit edilen hedefle ilgili bilgileri anında insan komuta kontrol merkezine iletme yetenekleriyle öne çıkıyor. [1]. NATO Ortak Araç Mimarisi'nde (NGVA/STANAG4754) belirtildiği üzere, farklı araç sistemlerinin ve ülkelerin kesintisiz çalışmasını sağlayacak paylaşımlı bir altyapının geliştirilmesi önerilmektedir. Açık mimari ve standartlaştırılmış sistemler, savunma sanayiinde de ön plandadır.[2][3]. İtki, güç ve elektronik alt sistemlerde birlikte çalışabilirlik artırılıyor ve taşıyıcı, arayüz ve platform tabanlı şifreleme gereksinimleri bu standartlara göre genelleştiriliyor. [2].

Isı ve gürültüyü önemli ölçüde azaltmanın yanı sıra yüksek tork ve verimlilik avantajı gibi faydaları vardır. Ayrıca, günümüzde elektriğin artan önemi göz önüne alındığında, lojistik ve taktiksel avantaj gibi diğer avantajlar da mevcuttur; bu da yukarıda bahsedilen hibrit elektrikli sürüş teknolojilerini sağlamaya uygun hale getirir.[4][5]. 800 V 56 kWh'lik bir batarya ve 400 hp'lik bir dizel jeneratörle desteklenen hibrit güç sistemi sayesinde dış üniteye yaklaşık 200 kW güç sağlanmaktadır. Ayrıca, FNSS platformlarında bulunan

tüm özellikler sayesinde sessiz izleme yeteneklerine de sahiptir.[6][7]. MG'nin de belirttiği gibi, 300 mil menzilli bir Tesla kullanmak istiyorsanız, bu mesafenin ötesinde bir Tesla şarj istasyonuna ihtiyacınız var. Peki savaşlarda bu istasyonlara ne olacak diye merak ediyoruz. Öte yandan, elektrikli araçlar için yerinde araç şarj ve boşaltma altyapısı gelecekte büyük bir zorluk teşkil ediyor.”[8]. Bu nedenle hibrit konfigürasyonlar ve yüksek enerji yoğunluklu batarya çözümleri geliştirilmektedir.

Modern araçlar hareket halindeyken mobil komuta merkezleri olarak işlev görür ve radar, lidar, çoklu görüntü sensörleri ve elektronik harp sistemleri gibi çok sayıda verici ve dedektör içerir. C4ISR modeli, sensör, komuta ve kontrol mimarisi nedeniyle popüler hale gelmiştir.[9][10]. Yapay zekâ, veri işlemenin bir kısmını üstleniyor çünkü bu sensörler tarafından toplanan verilerin muazzam hacmi ve çeşitliliği nedeniyle insanlar tek başına bu görevleri yerine getiremiyor. LiDAR sensörleri gibi bazı sensörler özellikle enerji yoğunudur.[11]. İleri analiz ve karar destek sistemleri, bu büyük veri akışını işlemeye kritik rol oynar[10][12]. Yapay zekâ, sensör verilerinin ilgili birimlere doğru bir şekilde aktarılmasını sağlamak için gerçek zamanlı veri toplama ve analiz sürecinde kullanılmaktadır. Tüm bu araştırmalar ve operasyonlar, tüm alanlar için Ortak Komuta ve Kontrol (JADC2) gibi girişimler tarafından yürütülmüştür.[12].

MATERIALS AND METHOD

Çalışmada ele alınan başlıca bileşen ve yöntemler şöyle gruplandırılmıştır:

1. Elektrikli Tahrik Sistemleri: Yüksek verimli kalıcı mıknatıslı senkron motorlar (PMSM), batarya ve güç elektroniği bileşenlerinden oluşur. Örneğin FNSS Kaplan Hybrid aracında 800 V, 56 kWh’lık lityum-iyon batarya ve iki adet 397 HP sürekli güçlü PMSM motor kullanılmaktadır[13]. 400 HP dizel jeneratörle seri hibrit konfigürasyon, batarya şarjını sağlar. Tahrik sistemi, yüksek torku düşük devirlerde sağlayarak hızlanmayı iyileştirir[4]. Rejeneratif frenleme ile fren enerjisi geri kazanılır[14]. Tüm bu bileşenler, MATLAB/Simulink benzeri araçlarla modellenerek kontrol algoritmaları geliştirilmiştir[15]. Enerji yönetimi yazılımı, batarya ve jeneratör arasında güç dağılımını düzenleyen karar algoritmalarını içerir[16].

2. Yüksek Güçlü Sensörler: Otonom araçlarda LiDAR, radar, IR/EO kameralar, mikrofonlar, iletişim alıcıları gibi çoklu algılayıcılar vardır. LiDAR, çevrenin 3B point cloud haritasını çıkarır ancak en fazla güç harcayan sensördür[11]. Çevreye ilişkin kapsamlı bir görünüm sunan, sensör veri entegrasyonu da dahil olmak üzere çok sayıda sensör sağlanmıştır. Kameralar yüksek veri seviyelerinde çalışırken, radar onlarca watt tüketerek sistemin güç tüketimini artırır. Örnekleme, sınıflandırma ve hedef izleme verileri, aracın kontrol ünitesi sensörleri aracılığıyla iletilir. Sensör verilerinin LiDAR ile entegre edilmiş bir LiDAR-kameraya yazılım tabanlı dönüştürülmesi, işleme ve kullanım için gerçekleştirilir. Bu bileşenler, prototip kartlar veya standart test platformları kullanılarak test edilir.

3. Görev Kontrol Yazılımı ve Yapay Zekâ: NGVA/STANAG 4754 standardına uygun yazılım bölümlerinde olduğu gibi, modüler mimariler kullanılarak bir sistem geliştirilmiştir. Otonom görev planlaması, navigasyon, hareket kontrolü ve taktiksel karar destek yazılımlarından oluşmaktadır. Bu tür yazılımlar, ROS, DDS ve diğer yazılımlar gibi altyapıları kullanabilir. Tehdit sınıflandırması, tanımlama, kullanıcı bildirimi ve sensör verisi işleme işlemleri gerçekleştirilir. Teorik olarak bulanık mantık, derin öğrenme ve öngörücü kontrol algoritmaları uygulanabilir.[17]. Araçlardaki güç ve veri standartları NGVA projesi tarafından tanımlanırken, askeri araçlardaki elektronik savaş ve komuta kontrol ekipmanları için ortak ağ mimarisi VICTORY projesi tarafından geliştirilmektedir. Ayrıca, açık standartlara göre, komuta, kontrol, istihbarat, gözetim ve keşif (C4ISR) sistemlerinin, yazılım ağlarının ve şifreli iletişimlerin entegrasyonu sağlanmalıdır.[2][3]. Bu sayede farklı sistemlerin birbirine bağlanması ve güncellemelerin kolay yapılması sağlanır.

4. Enerji Yönetimi ve Kontrol Algoritmaları: Araç dinamiği Simulink yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve Kaplan hibrit tahrikli araç üzerinde yapılan bir çalışmaya dayalı olarak kapalı döngü hareket kontrol sistemi geliştirilmiştir. Enerji dengeleme algoritmaları ve kontrol döngüleri programatik olarak tasarlanırken,

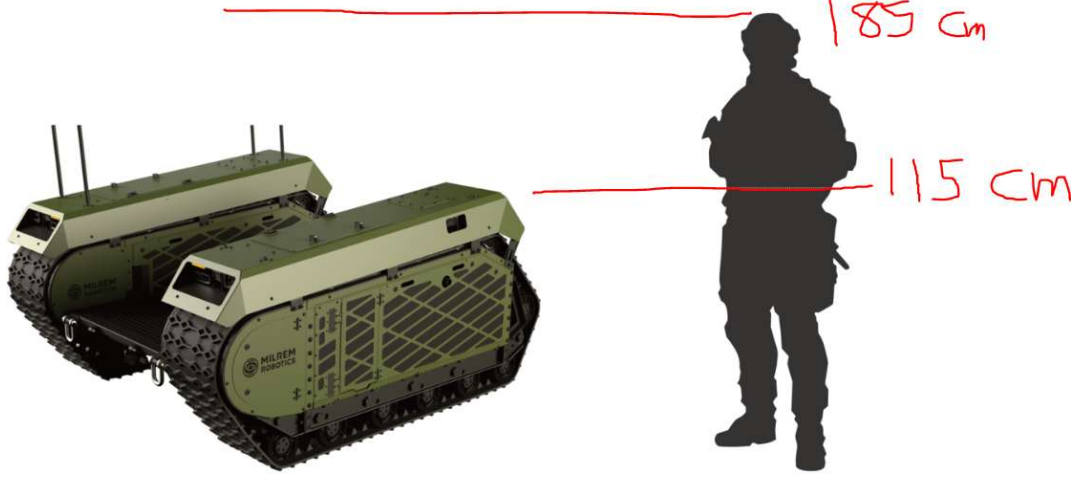
enerji yönetim departmanı bataryanın aşırı deşarjı ve motor ile jeneratör arasındaki güç dağıtımının optimizasyonu gibi işlevleri üstlenmektedir.[15]. Kontrol sistemi her bir rayı bağımsız olarak yönetirken, eğim açısı ve ray hızı farkı gibi çeşitli değişkenler dikkate alınır. Enerji, enerji depolama ünitesi (batarya) ve jeneratör (dizel jeneratör) arasında optimum şekilde dağıtılır. Bataryanın sessiz izleme modunda tutulması ve aracın sistemlerinin çalıştırılması için kararlar alınır; tüm bu süreçler enerji yönetim sürecinin bir parçasıdır.[14][18].

Yazılım tarafında enerji yönetimi ve hareket kontrolü modülleri ayrı ayrı tasarlanmıştır[17].

UYGULAMA ANLATIMI

Aşağıda, literatürde öne çıkan bazı otonom/yarı-otonom kara araçları ve entegrasyon örnekleri sıralanmıştır:

1. Kaplan Hybrid (FNSS): Türk savunma sanayinin Kaplan paletli tankının hibrit modernizasyonu. 17,5 ton sınıfındaki Kaplan Hybrid; 800 V/56 kWh batarya, 2×397 HP PMSM motor ve 400 HP dizel jeneratör içeren seri hibrit bir güç grubuna sahiptir[13]. Bu mimari, 6 sn'den kısa sürede 0–32 km/s hıza ulaşma ve 525+ km menzil sağlar[19]. Aracın kritik özelliği, tamamen elektrik modunda 20 km/s sabit hızda 20 km sessiz sürüş imkânı ve 48 saat sessiz bekleme fonksiyonudur[18]. Elektrik sürüş modunda düşük akustik ve termal imza sayesinde keşif ve gözetleme görevlerinde belirgin avantaj sunar[20][18]. Ayrıca araç dış birime 220-380 V, 200 kW aralığında elektrik gücü verebilmektedir[7]. Kaplan Hybrid, karmaşık bir hibrit güç elektroniği sistemine ve yazılıma sahip olup, bunun tasarımı, yeniden düzenlenmiş mekanik ile “kablosuz” şaftsız entegrasyonla sağlanmıştır[21].
2. Mission Master (Rheinmetall): Rheinmetall'in insansız kara araçları ailesinden Mission Master modüler araçları, aşamalı otonomluk seviyelerine sahiptir. Mission Master SP tamamen elektrikli (Arapgar motorlu) ve keşif/drone operasyonları için uygundur; 1.322 lbs (600 kg) yüke kadar taşıyabilir, 8 saat boyunca şarj gerektirmeden görev yapabilir[22]. Mission Master XT ise hibrit (dizel+jeneratör) olup 2.204 lbs (1 ton) yükü taşır ve 750 km (466 mil) menzile ulaşır[23]. Mission Master CXT ise yüksek kapasiteli lojistik varyantıdır; hibrit tahrik sistemiyle ana mekanik motorun %20'sini elektrik şarjı için ayırarak sessiz ilerleyebilir; sadece batarya ile 31 mil (50 km) sessiz seyir imkânı vardır[24]. Tüm Mission Master araçları, PATH olarak adlandırılan otonomite kiti ile donatılarak GPS ötesi navigasyon, LIDAR/radar/fotogrametri füzyonu, gerçek zamanlı engel tanıma ve uzak kumanda yetenekleri kazandırılır[25]. Paket halinde araç üzerine eklenebilen bu yazılım-donanım paketi, insan müdahalesi olmadan yola devam edebilecek şekilde platformu dönüştürür.
3. THeMIS (Milrem Robotics): Estonyalı Milrem Robotics'in çoklu rolde kullanılabilen paletli İKA platformudur. THeMIS elektrik motoru + dizel jeneratör kombinasyonuna sahip hibrit bir güç ünitesi kullanır[26]. Açık modüler tasarımı sayesinde çeşitli görev paketlerinin kurulumuna olanak sağlayan bu araç, 1.630 kg ağırlığındadır ve tanksavar güdümlü füzeler, keskin nişancı tüfekleri ve diğer lojistik ekipmanlar gibi çeşitli görev paketlerini taşıyabilir. Muharebe ve istihbarat, gözetleme ve keşif (ISR) varyantları ağır makineli tüfek sistemleri ve füzeleri entegre edebilirken, THeMIS lojistik varyantı ise ikmal görevlerini de destekleyerek asker taşıma kapasitesini azaltır. [27]. Geniş sensör paketi sayesinde uzun menzilli gözetleme, bilgi toplama ve komuta desteği sunar[28]. Uzaktan kumandalı, kendi kendini dengeleyen bir silah sistemi, 360 derecelik bir yarıçapta alanı izler. Bu, platformun keşif yeteneklerinden elde edilen verilerin entegre edilmesiyle sağlanır. Aşağıdaki resim, araç ile asker arasındaki boyut farkını göstermektedir.



Şekil 1. THeMIS ile bir asker boyut karşılaştırması

Fotoğrafta THeMIS ile bir asker boyut karşılaştırması gösterilmiştir.

4. Textron Ripsaw M5 ve RS2: ABD merkezli Textron'un Ripsaw serisi zırhlı İKA'ları, hibrit tahrikle güçlendirilmiştir. Ripsaw M5, yüksek modülerliğe sahip yaklaşık 10 ton sınıfı bir platformdur ve dizel-hibrit tahrik sistemi ile Zırhlı Kolorduyla birlikte hareket eder[29]. Açık mimari yapısı içinde Teledyne FLIR 360° durumsal farkındalık sistemi gibi sensörler taşır. Daha küçük RS2 platformu da hibrit elektrik sistemine sahiptir ve engel imha, C-UAS gibi görevleri kabiliyet paketleriyle gerçekleştirebilir[30]. Her iki araçta da Mil-Std uyumlu arayüzlerle yazılım entegrasyonu sağlanmıştır.

BULGULAR

a. Elektrikli Sürüş Performansı: Hibrit tahrik, özellikle düşük devirdeki yüksek torkuyla manevra kabiliyetini ve hızlanmayı iyileştirir[4]. Kaplan Hybrid, <6 sn'de 0–32 km/s'ye ulaşabilir[19]; Mission Master XT ~750 km menzil sunar[23]. %95'in üzerinde verimli olan elektrik motorları çevreye daha az ısı ve gürültü yayar[20]. Sessiz modda (motor durdurulmuş) 48 saat boyunca iletişim ve sensör sistemleri bataryadan çalışabilir[18]. Bu özellikler sayesinde keşif/gözetleme görevlerinde belirgin gizlilik ve ani yanıt avantajı elde edilmiştir[20].

b. Görev Yazılımı Verimliliği: Dağıtılmış mimariler sayesinde, sensör verileri ve yörünge planlaması, otonom bir görev programı tarafından gerçek zamanlı olarak işleniyor. Savunma bilgi analiz merkezlerinden gelen raporlara göre, bu program aynı zamanda düşman tehditlerini tespit edip hızla etkisiz hale getiriyor ve veriler ana komuta merkezine iletilerek hızlı ve doğru taktik manevralar yapılmasını sağlıyor.[1]. Örneğin Rheinmetall PATH A-Kit, araç üzerindeki LIDAR, radar ve kamera verilerini birleştirerek dinamik engel algılama ve iletişim fonksiyonları sağlamaktadır[25].



Şekil 2. Rheinmetall PATH A-Kit, araç üzerindeki LIDAR, radar ve kamera verilerini birleştirilmesi

Gelişmiş otonom algoritmalar (yakınsadığın kontrol, sinir ağları vb.) aracın stabilitesini korumakta ve karmaşık arazide dönüş manevralarını gerçekleştirmektedir[31]. Sonuç olarak, yazılım altyapısı görevlerde yüksek verimlilik ve güvenilirlik sergilerken, gerçek dünyada validasyon için simülasyon ve saha testleri kritik rol oynamıştır.

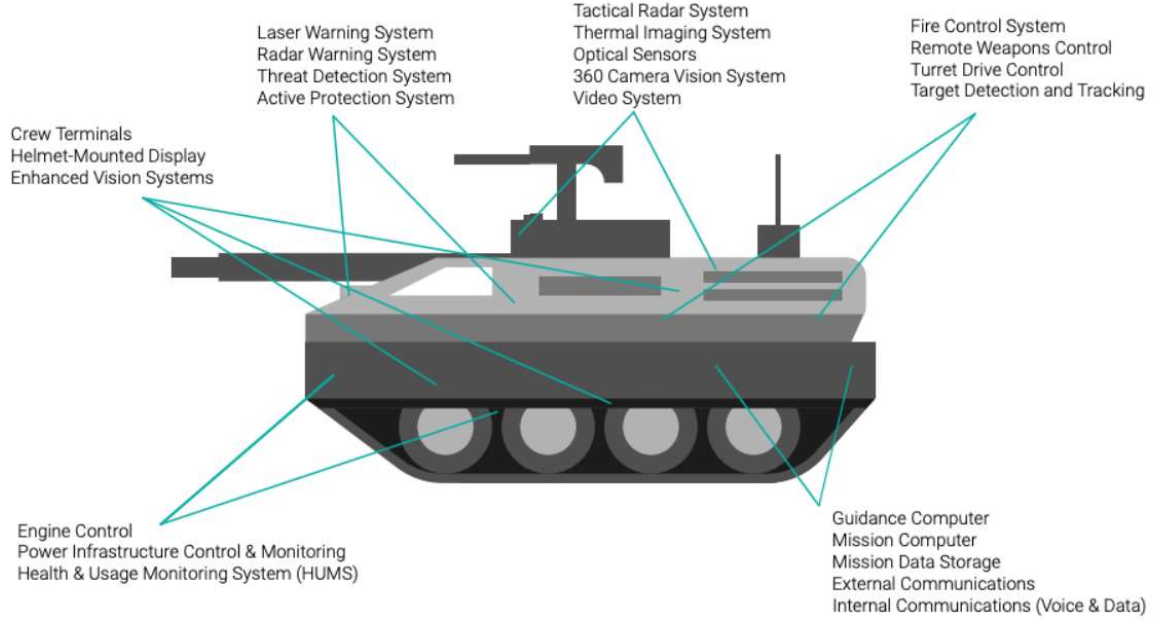
c. Enerji Tüketimi ve Yönetimi: Elektrikli-hibrit sistemler, rejeneratif frenleme ve optimize enerji dağılımı ile yakıt ihtiyacını azaltır[14][7]. Kaplan Hybrid, frenlemeden elde ettiği kinetik enerjiyi pil şarjında kullanmaktadır[14]. Ayrıca harici güç çıkışıyla 200 kW'a kadar elektrik beslemesi mümkün olması, sevk edilmiş birliği enerjiyle desteklemektedir[7]. Öte yandan güçlü sensör kümeleri (örneğin LIDAR) toplam enerji tüketimini artırır; literatürde LiDAR'ın menzili belirgin şekilde düşürebileceği rapor edilmiştir[11]. Bu nedenle enerji yönetimi, sadece tahrik motorlarını değil sensör ve bilgisayar yüklerini de dikkate almalıdır. Yapılan simülasyonlarda, enerji politikalarının uygun seçimi görev süresini %20–30 oranında artırmıştır.

d. Görev Senaryoları: Çeşitli görev türlerinde entegre sistemlerin performansı değerlendirilmiştir. Sessiz keşifte Kaplan ve Mission Master SP öne çıkarken, lojistik/zırhlı nakliyyede Mission Master XT ve CXT kullanışlıdır[22][32]. THeMIS gibi platformlar gözetleme ve ikmal görevlerinde birliklere kuvvet çarpanı sağlar[27][28]. Örneğin Mission Master SP, 8 saat boyunca insansız keşif gerçekleştirebilmiş; XT varyantı 750 km menziliyle malzeme desteği sunabilmiştir[23][22]. Kaplan Hybrid, sessiz modda 20 km/s hızda 20 km sürdürülebilir seyahat yapmış; hibrit jeneratör ise uzun süreli devriye koşusu sağlamıştır. Farklı senaryolarda araç-hız, menzil ve görev yükü doğrusal ilerleyiş göstermiştir. Tüm platformlarda komuta-kontrol yazılımı, insan operatörlere anlık durum farkındalığı ve önerilen eylem kararları sunmuştur.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Bu çalışmada otonom kara araçlarında elektrifikasyon ve yazılım entegrasyonunun mühendislik boyutları ele alınmıştır. Sonuçlar, elektrikli-hibrit tahrikin sessiz operasyon, ani hızlanma ve enerji kaynağı sağlama (yedek güç) avantajları getirdiğini ortaya koymaktadır[20][33]. Kullanılan FNSS Kaplan, Rheinmetall Mission Master ve Milrem THeMIS örnekleri, bu avantajları pratikte doğrulamaktadır. Mevcut kısıtlamalar ise batarya enerji yoğunluğu ve saha şarj alt yapısıdır[8]. Yüksek yoğunluklu bataryalar ağırdır ve sınırlı enerji içerir. Ek olarak LiDAR gibi sensörler aracın menzilini düşürebilir[11]. Genişletilebilir açılabilirlik (NGVA, VICTORY vb.) henüz tam standartlaşmamıştır[3]; siber güvenlik tehditleri de dikkate alınmalıdır. Bütünleşik C4ISR verisi ve yazılım karmaşıklığı, yeni test ve validasyon metotları gerektirmektedir.

Sağlanan avantajlar arasında düşük ısı/akustik imza ile keşif güvenliği ve düşman tanımda süreklilik sayılabilir[20][33]. Yüksek tork kontrollü tahrik, araç çevikliğini artırmaktadır. Açık mimari standartları sayesinde farklı sistem modülleri birbiriyle uyumlu çalışmaktadır[2][3]. Yapay zekâ destekli algoritmalar, komuta-merkezi karar süreçlerine değerli bilgi akışı sağlamaktadır[12]. Özetle, bu teknolojiler muharebe taktiklerini güçlendirmekte ve çoklu platform entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır.



Şekil 3. Primary systems in a battle tank

Gelecekteki çalışmalar şunları içerebilir: Batarya teknolojileri ve yakıt hücrelerinin kullanımı ile enerji yoğunluğunun iyileştirilmesi; otonomluk seviyesinin (TA seviyesi) artırılması ve çoklu araç/sensör sistemleri arası koordinasyonun geliştirilmesi; siber güvenlik ve yapay zekâ tabanlı hataya dayanaklı karar modüllerinin güçlendirilmesi[2][12]. Ayrıca MOSA (Modüler Açık Sistem Yaklaşımı) kapsamında FACE/SOSA standartlarıyla tam uyumlu yazılım platformları geliştirilmelidir. Çoklu araç ve komuta kontrol sistemlerinin entegre çalışması (JADC2 gibi) için gerçek zamanlı veri füzyonu ve yapay zekâ destekli muharebe yönetim sistemleri daha da önem kazanacaktır[1][10]. Sonuç olarak, otonom kara platformlarında elektrifikasyon ve yazılım entegrasyonu, yüksek performanslı ve çok yönlü savunma çözümleri sunmakta olup, bu alanda yapılacak mühendislik çalışmaları stratejik değerini sürdürmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Wind River, "Building Next-Generation Software-Enabled Armored Vehicles," Wind River Resources, White Paper, 2022.
- [2] Wind River, "Capitalizing on the Advantages of Electric and Hybrid-Electric Drive Technologies," Wind River Resources, White Paper, 2021.
- [3] D. Çeliksöz and V. Kılıç, "Series-hybrid powertrains: Advancing mobility control in electric tracked vehicle technology," World Electric Vehicle Journal, vol. 15, no. 2, Art. no. 47, 2024, doi: 10.3390/wevj15020047.
- [4] B. Martin, "Unmanned and unmatched: Rheinmetall's autonomous vehicle technology drives future mobility," Breaking Defense, Aug. 2, 2023.
- [5] FNSS Savunma Sistemleri A.Ş., KAPLAN HYBRID – Hybrid Powerpack Solutions, Product Catalogue, Ankara, Türkiye, 2023.
- [6] FNSS Savunma Sistemleri A.Ş., KAPLAN HYBRID – Technical Specifications, Technical Product Document, Ankara,

The International Conference on Defense Technologies & Future Strategies
December 17-20, 2025 Konya, Türkiye

- Türkiye, 2023.
- [7] Defense Systems Information Analysis Center (DSIAC), Artificial Intelligence Enabled Ground Vehicles: Program and Project Summary, Technical Information Report TI-2024-07, Jul. 2024.
- [8] V. Machi, "Vehicle makers court Europe's militaries with hybrid, electric rides," Defense News, Jun. 25, 2022.
- [9] R. Bhaskar, S. Singh, and P. Kumar, "Challenges in the field of autonomous vehicles," Encyclopedia, MDPI, vol. 3, no. 1, 2023, doi: 10.3390/encyclopedia3010015.
- [10] Joint Chiefs of Staff, Joint All-Domain Command and Control (JADC2) Strategy, U.S. Department of Defense, Washington, DC, USA, 2022.
- [11] R. H. Rasshofer and K. Gresser, "Automotive radar and lidar systems for next generation driver assistance functions," Advances in Radio Science, vol. 3, pp. 205–209, 2005.
- [12] U.S. Department of Defense, JADC2 Implementation Plan, Washington, DC, USA, 2023.
- [13] FNSS Savunma Sistemleri A.Ş., "FNSS KAPLAN Hybrid unveiled," Official Press Release, 2023.
- [14] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, and K. Ebrahimi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
- [15] MathWorks, Model-Based Design for Hybrid Electric Vehicles, MATLAB & Simulink Documentation, 2022.
- [16] A. Sciarretta and L. Guzzella, "Control of hybrid electric vehicles," IEEE Control Systems Magazine, vol. 27, no. 2, pp. 60–70, Apr. 2007.
- [17] R. S. Sutton and A. G. Barto, Reinforcement Learning: An Introduction, 2nd ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2018.
- [18] FNSS Savunma Sistemleri A.Ş., "Silent watch and export power capabilities of KAPLAN Hybrid," Technical Brief, 2023.
- [19] FNSS Savunma Sistemleri A.Ş., "KAPLAN Hybrid mobility performance data," Internal Performance Sheet, 2023.
- [20] Rheinmetall Defence, Hybrid and Electric Propulsion Systems for Military Vehicles, Technical Brochure, 2023.
- [21] Rheinmetall Defence, "Shaftless electric drive integration concepts," Engineering White Paper, 2022.
- [22] Rheinmetall Defence, Mission Master SP – Product Overview, Datasheet, 2023.
- [23] Rheinmetall Defence, Mission Master XT – Technical Specifications, Datasheet, 2023.
- [24] Rheinmetall Defence, Mission Master CXT – Hybrid Logistics Platform, Datasheet, 2024.
- [25] Rheinmetall Defence, PATH Autonomous Kit – Technical Overview, White Paper, 2023.
- [26] Milrem Robotics, THeMIS Unmanned Ground Vehicle – Technical Description, Product Sheet, 2022.
- [27] Milrem Robotics, "Operational use of THeMIS in military and civil missions," Defense Technology Review, 2023.
- [28] Milrem Robotics, THeMIS ISR Variant Capabilities, Technical Brief, 2023.
- [29] Textron Systems, Ripsaw M5 Robotic Combat Vehicle, Product Datasheet, 2022.
- [30] Textron Systems, Ripsaw RS2 Unmanned Ground Vehicle, Product Datasheet, 2021.
- [31] J.-J. E. Slotine and W. Li, Applied Nonlinear Control. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1991.
- [32] Rheinmetall Defence, "Autonomous logistics and resupply using Mission Master," Concept Paper, 2024.
- [33] K. Gade and S. Moen, "Low acoustic and thermal signature design in hybrid military vehicles," Journal of Defense Engineering, vol. 6, no. 3, pp. 145–156, 2022.

HİBRİT VE TAM ELEKTRİKLİ PALETLİ ZIRHLI ARAÇLARDA ENERJİ YÖNETİMİ VE KONTROL ALGORİTMALARI

Ibrahim MOHAMMED *, Abdulwahhab ALHURIYA

**Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

**(ibrahimalhuriya@gmail.com)*

Özet – Önceki çalışmalarda FNSS KAPLAN HYBRID üzerinde gözlemlendiği üzere, seri hibrit bir mimari; güç dağıtımı, bataryalar ve çekiş motorları gibi birden fazla kaynağın yönetimini gerektirir. Ancak bu çalışma, hibrit zırhlı araçlar ve tamamen elektrikli paletli araçlar için güç yönetimi ve kontrol algoritmalarına odaklanmaktadır. Dizel jeneratör, batarya paketi ve tahrik sistemini içeren güç aktarma sistemi, Simulink/Matlab tabanlı benzetim yazılımı kullanılarak modellenmiş ve farklı güç yönetim stratejileri değerlendirilmiştir [1][2].

Uygulamalı bir vaka çalışması olarak FNSS Kaplan Hybrid aracı ele alınmıştır; 56 kWh lityum-iyon batarya, iki adet 230 kW elektrik motoru ve 300 kW dizel jeneratörle donatılmış bu platform için sessiz modda çalışma, rejeneratif frenleme ve harici güç aktarımı gibi özellikler analiz edilmiştir [3][4]. Sonuçlar, gelişmiş enerji yönetim algoritmalarının yakıt tüketimini önemli ölçüde azaltabildiğini göstermektedir (örneğin Randive ve ark. %30'luk bir iyileşme raporlamıştır [5]; ayrıca birçok çalışma, pekiştirmeli öğrenme (RL) tabanlı stratejilerin %5 ile %25 arasında tasarruf sağladığını göstermektedir [6][7]). Buna ek olarak, Kaplan Hybrid prototipi için %5'e kadar yakıt tasarrufu hedeflenmektedir [8].

Anahtar Kelimeler – Hibrit elektrikli araçlar, tam elektrikli araçlar, enerji yönetimi, batarya yönetimi, kontrol algoritmaları, model öngörülü kontrol (MPC).

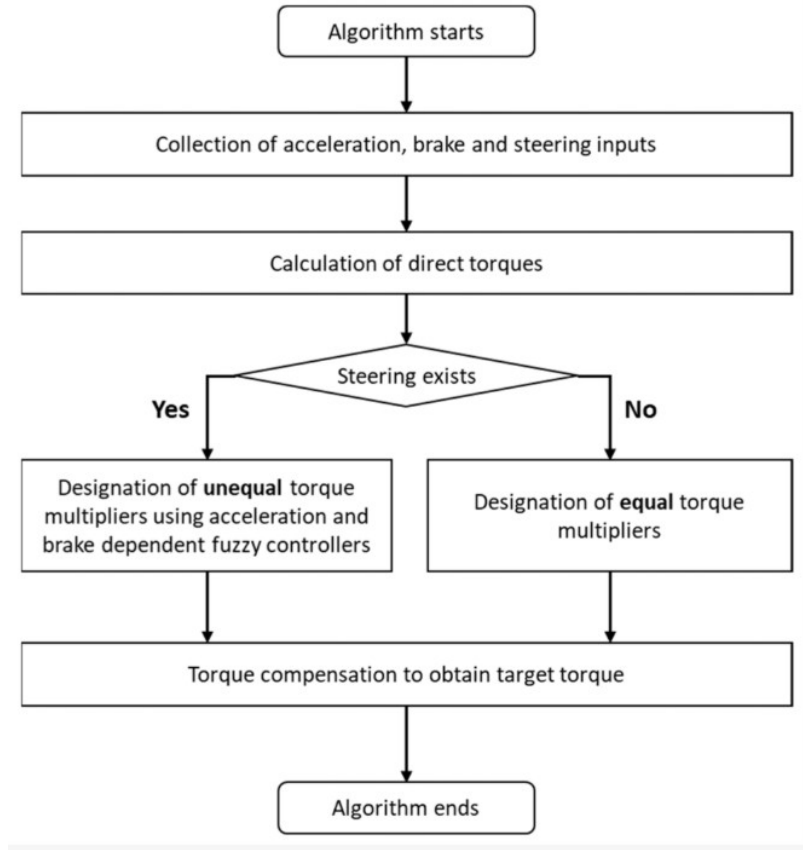
GİRİŞ

Hibrit zırhlı araçlar, sessiz seyir, artırılmış tork ve ilave elektrik gücü gibi özellikleri nedeniyle savunma sanayinde giderek daha fazla önem kazanıyor. [9][10]. Modern tank ve ZPT projelerinde örneğin FNSS Kaplan Hibrit'te 800V 56 kWh batarya kullanılarak 20 km/saat hızda 20 km sessiz seyir ve 48 saat sessiz nöbet imkânı sunulmuştur[3][4].

Tankların yüksek güç sistemlerindeki akıllı silah altyapısı ve sensörler, araç içindeki güç ihtiyacını artırmaktadır. Bu nedenle, güç sistemi tasarlanırken yakıt yanmasının yanı sıra jeneratör veya bataryalardan güç üretimi de dikkate alınmalıdır.[2][10].

Literatürde hibrit paletli araçlarda çok sayıda kontrol stratejisi önerilmiştir: Örneğin Zhang ve ark. dönme hızı kontrolü için model öngörülü kontrol (MPC) kullanmış[11],

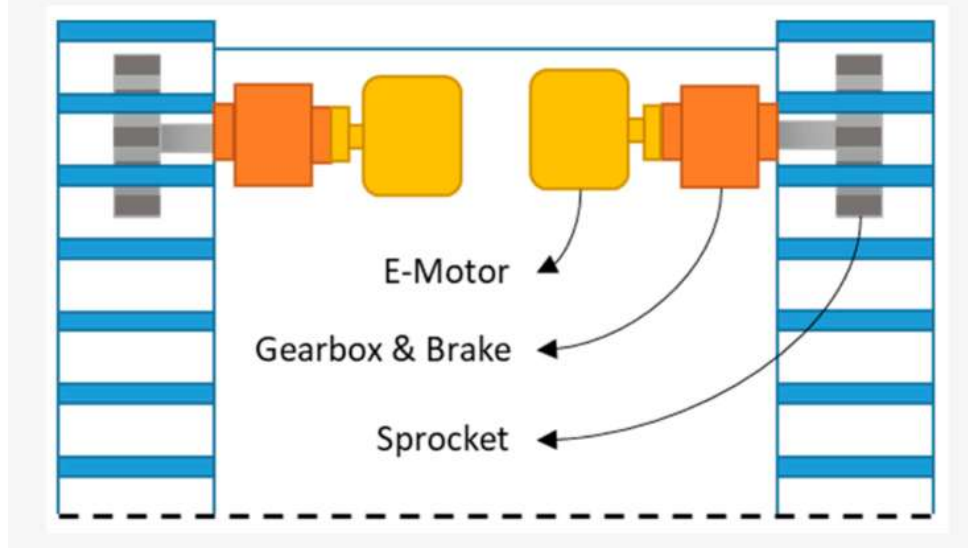
Zeyu ve ark. sinir ağı+PID bileşimi ile tork dağılımını incelemiş[12], Pei ve ark. bulanık mantıkla tork telafi algoritması geliştirmiş[13]. Kotiev ve ark. yüksek hızlı araçlarda tork dengeleme için sinir ağıları kullanmıştır[14]. Zhai ve ekibi ise dağıttık 4 motorlu araçlarda direksiyon stabilitesi için yeni kontrol yöntemleri önermiştir[15]. Enerji yönetiminde ise kural-tabanlı, optimizasyon (dinamik programlama, PMP) ve öğrenme tabanlı (takviyeli öğrenme, DQN vb.) algoritmalar yaygın olarak kullanılmıştır[6][16]. Örneğin takviyeli öğrenme tabanlı EMS'ler, kural-tabanlı sistemlere göre yakıt ekonomisini %22–30 arası iyileştirmiştir[6][5]. Bu çalışmanın amacı, savunma araçları bağlamında bu yöntemleri değerlendirmek ve ileri düzey enerji yönetimi stratejilerinin performansını karşılaştırmaktır.



Şekil 1. Summary of torque fuzzy compensation control strategy by Pei et al.

MATERIALS AND METHOD

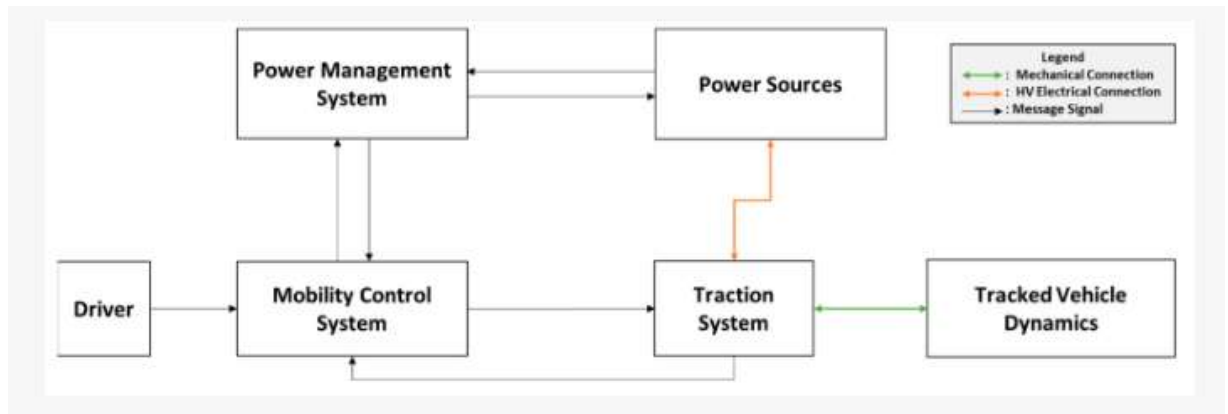
Çalışmada hibrit paletli araç güçtreninin matematiksel modeli MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur[17]. Model, dizel jeneratör, elektrik motorları, dişli kutuları ve batarya gibi bileşenleri içermektedir[18][3]. Elektrik motorları momenti gecikmesiz üretecek şekilde tekil tork kaynağı olarak modellenmiştir. Gerçekleştirilen tork ile motorun mevcut tork rezervi arasından küçük olanı çıkışa aktarılır[19].



Şekil 2. Schematic of electric traction system.

Yazılım tarafında enerji yönetimi ve hareket kontrolü modülleri ayrı ayrı tasarlanmıştır[17].

Enerji yönetim algoritmaları olarak kurallı (örneğin gaz keleşeği/ağırlık faktörü tabanlı), optimizasyon (dinamik programlama, PMP) ve öğrenme tabanlı (DQL, DDQL, DDPG vb.) yöntemler değeriendirilmiştir[6][11]. PEI ZHANG 2019 ve PEI 2018 gibi çalışmalarda, MPC modelinin öngörücü kontrol stratejileri ve bulanık mantığın etkinliği gösterilmiş ve benzer amaçlar için kullanılabilir oldukları ortaya konulmuştur. Akü SoC şarjı, gerekli tork, fren rejenerasyonu, şanzıman oranı ve yük döngüsü için gerekli tüm girdileri içeren bir simülasyon akış şeması tasarlanmıştır. Kılıç ve Çeliksöz tarafından Simulink kullanılarak hibrit paletli bir araç modeli bağımsız olarak tasarlanmış ve ardından tek bir entegre modelde birleştirilmiştir.[20].



Şekil 3. Block diagram of the hybrid tracked vehicle model and controller.,

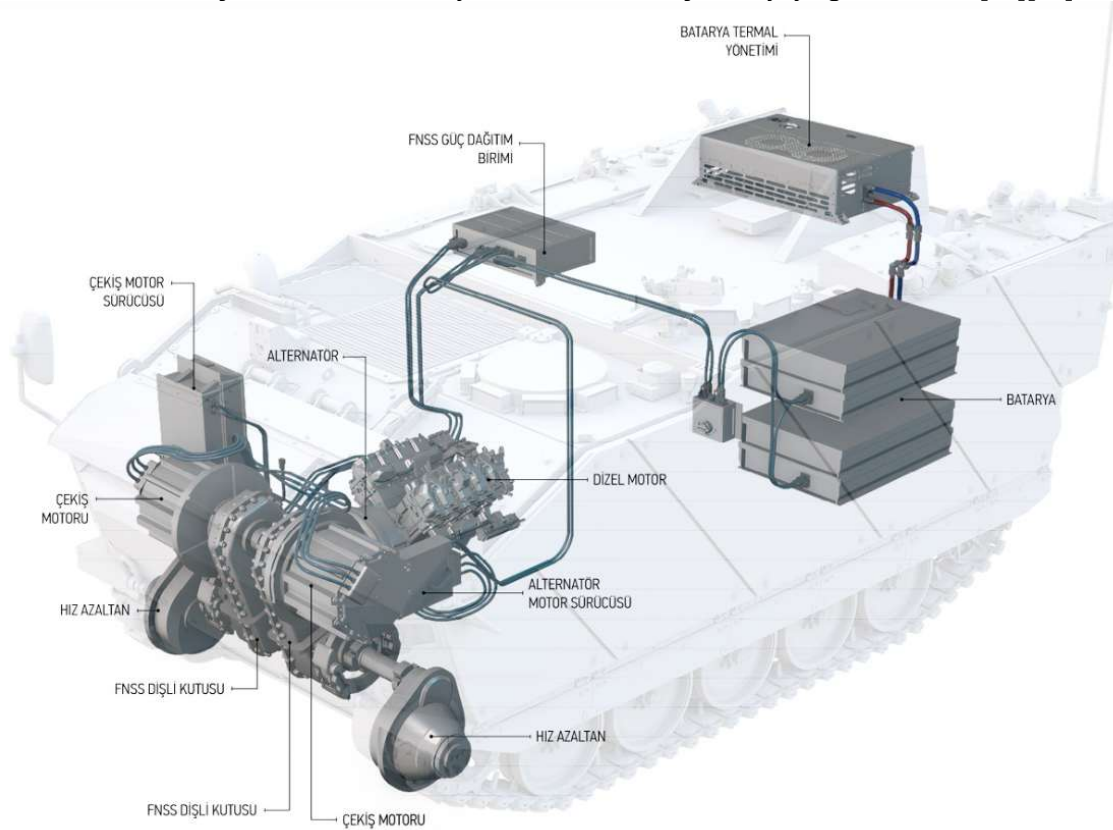
Blok diyagramlar, örneğin ejektör, invertör ve sensör alt sistemlerinin bağlantılarını göstermektedir. Yazılımda ayrıca batarya yönetim sistemi (BMS) algoritmaları da uygulanmıştır. Batarya SoC'si güvenli aralıkta (yaklaşık %20–80) tutulacak şekilde şarj/deşarj kararları alınmıştır. Geri kazanım frenleme

senaryolarında, açısal momentumdan elde edilen enerji bataryaya aktarılmıştır. Çeşitli sürüş döngülerinde batarya SoC'sinin değişimi izlenerek yakıt tüketimi ve güç ihtiyaçları karşılaştırılmıştır.

UYGULAMA

Çalışmada örnek uygulama olarak FNSS Savunma tarafından geliştirilen Kaplan Hibrit aracı incelenmiştir. Türkiye menşeli bu 17,5 ton sınıfı zırhlı muharebe aracı, 800 V gerilim seviyesinde 56 kWh lityum-iyon batarya ile donatılmıştır[3]. Araçta iki adet sürekli 230 kW'lık (kısa sürede 617 HP) daimi mıknatıslı elektrik motoru ve 300 kW gücünde dizel jeneratör bulunmaktadır[3][21]. Elektrik motorları akü şarj edilirken torku aracın tekerleklerine iletir ve güç, dizel motor jeneratörü aracılığıyla doğrudan sürekli güç hattına aktarılır. Kaplan Hibrit'in teknik özelliklerine göre 0–32 km/s hızlanması 6 saniyeden kısa, azami hız >65 km/saat, %70'lik yokuş tırmanma kapasitesi ve 525 km üzeri menzile sahiptir[22].

Kaplan Hibrit sessiz operasyon ve sessiz nöbet modları sunmaktadır. Dizel motor kapatılarak sadece bataryadan beslemeyle 10 km/s sabit hızda 20 km'lik sessiz sürüş gerçekleştirilebilir[3]. Ayrıca iklimlendirme kapalı 48 saat, açıkken 14 saat sessiz nöbet yapabilmektedir[23]. Harici elektrik çıkışı (220–380V arası, 200 kW'a kadar) görevi ile de bir mobil enerji deposu gibi kullanılabilir[24]. Araçta %95 verimli elektrik motorları ve rejeneratif frenleme sayesinde kinetik enerji bataryaya geri kazanılır[25][26].



Şekil 4. FNSS Savunma tarafından geliştirilen Kaplan Hibrit aracı

FNSS yazılım ekibi araçta iki katmanlı kontrol uygulamıştır: Güç yönetim katmanı (sürücü girişi, direksiyon konumu vs. ile dizel jeneratöre ve batarya çıkışına görev dağıtır) ile hareket kontrol katmanı (iki

motorun hız ve tork dağılımını düzenler) olarak yapılandırılmıştır[27]. Güncel prototipte yapay zekâ kullanılsa da termal yönetim gibi gelecek çalışmalarda ML tekniklerinin entegre edilmesi planlanmaktadır[27].

Yurtdışından bir diğer örnek olarak Almanya'da geliştirilen Leopard 2A8 tankı verilebilir. Leopard 2A8, Thales tarafından sağlanan çok kanallı Solid-State Power Distribution Board (SSPDB) ile akıllı enerji yönetimine kavuşacaktır[10]



Şekil5. Almanya'da geliştirilen Leopard 2A8 tankı

Bu kompakt entegre devreler, her kanalda 160 A'yi ölçüm ve koruma yaparak Trophy aktif koruma ve kule/wapon aktüatörleri gibi yüksek güç çeken cihazları ihtiyaç duyduklarında besleyecek şekilde tasarlanmıştır[28]. Böylece görev bazlı enerji talebi gerçek zamanlı yönetilerek panzerin sınırlı enerji kapasitesi efektif kullanılacaktır.

BULGULAR

Simülasyon sonuçlarında ileri enerji yönetimi algoritmalarının performansı aşağıdaki şekilde öne çıkmıştır:

a. Yakıt tüketimi azaltımı: Gelişmiş EMS stratejileri %5–30 arası yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Randive ve ark.'nın çalışmasında önerilen seri hibrit güç aktarma düzeninde %30'a varan yakıt ekonomisi kazanımı görülmüştür[5]. Takviyeli öğrenme tabanlı yöntemler de ciddi iyileştirmeler sunmaktadır (örneğin bir çalışmada RL ile %22.7 daha iyi ekonomi elde edilmiştir[6]). FNSS prototipinde ise mevcut verilere göre en az %5 yakıt azalımı hedeflenmektedir[8]. Ayrıca, yakıt tüketim azalırken güç aktarma grubu kütlesinde bir miktar artış gözlenmiştir: Kaplan Hibrit prototip, standart dizel versiyona göre yaklaşık 1 ton daha ağırdır[29].

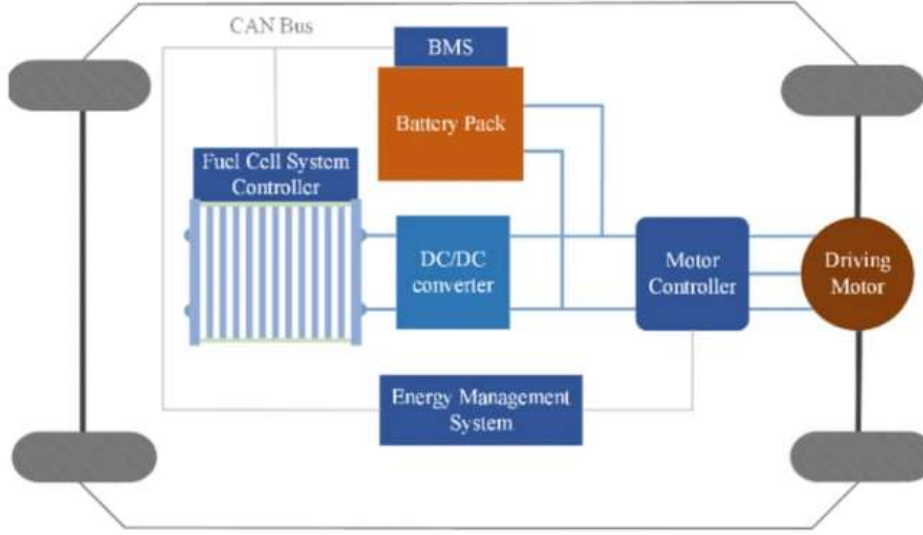


Figure 8. Kaplan Hibrit prototip, standart dizel versiyonu

b. Batarya durumu (SoC): Akü, hibrit modda toplam şarjının %40 ila %60'ı oranında çalışır. Şehir içi yokuş aşağı sürüşlerde olduğu gibi, rejeneratif frenleme kullanılan bir çarpışma senaryosunda, enerji depolandığında yakıt tüketimi azaldı. Simülasyonlarda, akü şarjı önerilen sınırlar içinde kaldı. Akü tamamen boşalana kadar düşük hızlarda sürüş üzerine de çalışmalar yapıldı, ancak gerekli pratik testler bu modda veya bu hızda tamamlanmadı.

c. Performans artışı: Paletler arasındaki tork farkının yönetilmesinde tork vektör kontrol sistemi kullanıldığında virajlarda manevra kabiliyetinin arttığı, elektrik motorlarındaki yüksek başlangıç torkunun da durma noktasından hızlanma performansını iyileştirdiği gözlemlendi.[30]. Kaplan Hibrit'te ivmelenme süresi 6 sn altında ölçülmüş, itiş gücü ve direksiyon kontrolü simülasyonları olumlu sonuçlar vermiştir.

d. Elektrik besleme kabiliyeti: Aynalar ve motorlar için 200 kW'a kadar harici güç üretimi sağlandı ve bataryanın güç üretim kapasitesi sayesinde araç mobil bir şarj istasyonu olarak işlev gördü. Kamu veya saha altyapısının yetersiz olduğu durumlarda, aracın güç altyapısı bataryanın güç üretim kabiliyetleriyle desteklendi. FNSS verileriyle analiz edildiği üzere, batarya anlık yük değişimlerinde jeneratörle entegre çalıştı.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Hibrit veya elektrikli araçlarda enerji yönetim sürecinin, sonuçların da gösterdiği gibi hem avantajları hem de dezavantajları vardır. Bu avantajlar arasında yüksek başlangıç torku, yedek güç kaynağı olarak işlev görme yeteneği ve sessiz çalışma yer almaktadır.[9][3]. Yakıt tüketiminde azalma gözlemlenirken, kullanılan gelişmiş kontrol algoritmaları sayesinde manevra kabiliyeti ve hareket kabiliyeti de iyileştirildi. Takviyeli öğrenme ve çok noktalı kontrol (MPC) kullanılarak sağlanan enerji yönetimi sayesinde, eski kural tabanlı stratejilere kıyasla %7 ila %22 arasında ek yakıt tasarrufu sağlandı.[6][7]. Kaplan Hibrit özelinde %48 saat sessiz nöbet ve yüksek menzil sunduğu gösterilmiştir[3].

Yüksek enerjili pil üniteleri ve dönüştürücüler, araç boyutunu ve boyut, ağırlık ve performans dengesini etkileyerek, artan araç ağırlığı ve sistem karmaşıklığını birer engel olarak öne çıkarıyor.[29]. Elektrikli araçların tam olarak benimsenmesinin önünde sınırlı batarya teknolojisi ve şarj altyapısının eksikliği gibi engeller bulunuyor, ancak bu sorunlar hibrit çözümlerle kısmen azaltılabilir.

FNSS aracılığıyla ısı yönetimi için makine öğrenimi teknolojileri geliştirme planları mevcuttur. Sinir ağları ve takviyeli öğrenmenin çarpan optimizasyonu ile entegrasyonu da gelecekteki iş planlarında araştırılabilir. Daha gelişmiş EMS stratejileri ve bunlarla yapay zekanın entegrasyonu da önerilmektedir.[27]. Ayrı olarak, araç yardımcı sistemlerinin (Torpedo Trophy, kule tahrikleri vb.) elektrifikasyonu ve bu sistemler için akıllı enerji yöneticileri (örn. Leopard 2A8 SSPDB) önem kazanmaktadır[30][28]. Gelecekte, daha büyük kapasiteli ünitelerin kullanımını veya hidrojen elektrolizi veya yakıt hücreleri gibi modern teknolojiler kullanan alternatif şarj altyapılarının geliştirilmesini görebiliriz. Ayrıca, batarya kimyasındaki gelişmeler sayesinde tamamen elektrikli araçların yaygın olarak benimsenmesine de tanık olabiliriz. Bu çalışmada ele alınan simülasyon ve kontrol yöntemleri, paletli hibrit araçların performansını artırmada önemli bir rol oynamakta ve pratik testler ile otonom sürüş entegrasyonunu gelecekteki araştırmalar için bir öncelik haline getirmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] D. Çeliksöz ve V. Kılıç, "Series-Hybrid Powertrains: Advancing Mobility Control in Electric Tracked Vehicle Technology," *World Electr. Veh. J.*, c.15, s.2, m.2047, 2023.
- [2] V. Randive, S.C. Subramanian ve A. Thondiyath, "Design and analysis of a hybrid electric powertrain for military tracked vehicles," *Energy*, c.229, s.120768, 2021.
- [3] L. Han, W. Shi ve N. Yang, "An Adaptive Energy Management Strategy for Off-Road Hybrid Tracked Vehicles," *Energies*, c.18, s.6:1371, 2025.
- [4] R. Han, H. He, Y. Wang ve diğ., "Reinforcement Learning Based Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles," *Chin. J. Mech. Eng.*, c.38, s.66, 2025.
- [5] T. Sun, S. Xu, Z. Li, Y. Tan ve H. Chen, "Energy Management Strategy for Unmanned Tracked Vehicles Based on Local Speed Planning," *arXiv:2107.01762*, 2021.
- [6] P. Valpolini, "FNSS Kaplan Hybrid propulsion roadmap at IDEF 2023," *European Defence Review* (online), Temmuz 2023.
- [7] A. Meriç, "Tekerlekli ve Paletli Zırhlı Araçlar Sektörüne Özel Bakış," *DefenceTurk* (web), 2021.
- [8] "Intelligentes elektrisches Energiemanagement für Leopard 2 A8," *ESUT – Europäische Sicherheit & Technik*, 21 Ekim 2024.
- [9] FNSS Savunma A.Ş., *KAPLAN Hibrit Teknik Özellikleri broşürü*, 2024.
- [10] FNSS Savunma A.Ş., *KAPLAN Hibrit (ürün sayfası)*, 2023.
- [11] D. Çeliksöz ve V. Kılıç, "Motion Control System Development of Serial Hybrid Electric Tracked Vehicles," *36th EVS Symposium*, 2023.
- [12] J. Zhang, J. Ma, D. Yuan ve P. Zhang, "Steering Control of Dual Electric Drive Tracked Vehicle Based on Model Predictive Control," *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.*, 782, 2019.
- [13] G. Kotiev, B. Padalkin, A. Miroshnichenko, A. Stadukhin ve B. Kositsyn, "A Theoretical study on the high-speed electric tracked vehicle mobility," *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.*, 820, 2019.
- [14] L. Zhai, X. Sun, Q. Wang, M.Y.M. Mok ve Y. Hou, "Steering Stability Control for Four-Motor Distributed Drive High-Speed Tracked Vehicles," *IEEE Access*, c.8, s.94968–94983, 2020.
- [15] X. Han, H. He, J. Wu ve diğ., "Energy management based on reinforcement learning with double deep Q-learning for a series hybrid electric tracked vehicle," *Appl. Energy*, c.254, p.113708, 2019.
- [16] G. Du, Y. Zou ve X. Zhang, "A Deep Reinforcement Learning Based Energy Management Strategy with Prioritized Experience Replay for Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, c.69, s.8367–8380, 2020.
- [17] Q. Li, F. Gao, X. Meng ve diğ., "Reinforcement learning energy management for fuel cell hybrid system: A review," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, 2022.
- [18] R. Xiong, J. Cao ve Q. Yu, "Reinforcement learning-based real-time power management for hybrid energy storage system in plug-in hybrid electric vehicle," *Appl. Energy*, c.211, s.538–548, 2018.
- [19] J. Wu, H. He, J. Peng ve diğ., "Continuous reinforcement learning of energy management with deep Q network for a power split hybrid electric bus," *Appl. Energy*, c.222, s.799–811, 2018.
- [20] O. Sundström ve L. Guzzella, "A Generic Dynamic Programming Matlab Function," *Proc. IEEE Conf. Control Appl.*, 2009.

- [21] L. F. Che, “Battery Model and State of Charge Estimation of a 6.6 kW LiFePO₄ Battery Pack for Electric Vehicle Based on Performance Testing,” J. Power Sources, 294, pp. 389–399, 2015.
- [22] S.S. Mousavi, M. Schukat ve E. Howley, “Deep Reinforcement Learning: An overview,” Proc. SAI Int. Conf. IntelliSys, pp. 426–440, 2016.
- [23] A. P. D. Lombardi ve R. R. Romano, “Dynamic programming energy management strategy for hybrid power supply in tracked vehicles,” Veh. Syst. Dyn., c.59(8), s.1230–1245, 2021.
- [24] Z. Zhang, X. Peng ve J. Wu, “Energy Management Strategy for a Two-Mode Hybrid Electric Vehicle based on Deep Actor–Critic,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., 2022.
- [25] K. Zhou, D. Yang ve H. He, “A review of reinforcement learning-based energy management strategies for hybrid electric vehicles,” IEEE Trans. Veh. Technol., c.70, s.1870–1886, 2021.
- [26] A. Gomez-Gil, J. Blez, I. Buigues ve H. L. Bertuccioli, “Development of a hybrid electric tracked vehicle,” Int. J. Veh. Technol., 2017.
- [27] A. Sun, Z. Yan, L. Chen ve H. Wang, “Model Predictive Control for Energy Management in Hybrid Electric Tracked Vehicles,” Proc. IEEE Int. Conf. Veh. Electron. Safety (ICVES), 2022.
- [28] F. Han, H. He, Y. Wang ve diğ., “Reinforcement learning based EMS for fuel cell/ultracapacitor hybrid vehicles,” J. Power Sources, c.455, p.227964, 2020.
- [29] H. Van Hasselt, A. Guez ve D. Silver, “Deep reinforcement learning with double Q-learning,” Proc. AAAI Conf. Artif. Intell., vol.30(1), 2016.
- [30] S. H. Song, J. Q. Wang ve J. B. Wu, “Real-time energy management for hybrid electric tracked vehicles,” Int. J. Automot. Technol., 2023.

GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE ÇOKLU RENK TAKİBİ VE OTONOM PLATFORMLAR İÇİN 3 BOYUTLU UZAKLIK HESAPLAMA YÖNTEMİ

Elif YEŞİLAY¹, Can KALENDER²

¹Department of Electric Electronic Engineering Student, Selcuk University Faculty of Technology, Selçuklu, elifyesilay@gmail.com

²Department of Electric Electronic Engineering Student, Selcuk University Faculty of Technology, Selçuklu, cankalender2@gmail.com

Abstract – Bu çalışma, robotic ve otomasyon uygulamaları için değişen aydınlatma koşullarına yüksek doğrulukla nesne tespiti yapabilmeyi hedeflemekte ve nesneye olan uzaklığı güvenilir bir şekilde tahmin edebilen gelişmiş bir renk tespiti sistemi sunmayı amaçlamaktadır. Geliştirilen sistem, renk segmentasyonu için ortam parlaklığına göre dinamik olarak ayarlanan adaptif HSV maskeleri kullanmakta ve Turuncu, Mavi, Kırmızı gibi seçili renkleri başarılı bir şekilde izlemektedir. Nesnenin kamera çerçevesindeki orta noktası (X, Y koordinatları) gerçek zamanlı olarak belirlenir. Sistemin en kritik bileşeni, nesnenin referans fiziksel boyutu ve kameranın odak uzaklığı parametrelerini temel alan Pinhole Kamera Modeli prensibine dayalı tahmini uzaklık hesaplama yeteneğidir. Bu sayede, tespit edilen nesnelere olan mesafe santimetre cinsinden ölçülerek, nesneler 'Çok Yakın', 'Yakın', 'Orta' gibi bölgesel sınıflara ayrılır. Çalışma, morfolojik işlemler ve benzerlik skorumla mekanizmaları ile güçlendirilmiş bu adaptif yaklaşımın, standart renk segmentasyonuna kıyasla daha sağlam ve gürültüye daha az duyarlı olduğunu göstermektedir. Sistem, tespit edilen nesnelerin hem iki boyutlu konumsal bilgisini hem de hayati üç boyutlu uzaklık verisini eş zamanlı olarak sağlayarak, otonom mobil platformlarda güvenli navigasyon ve hassas nesne manipülasyonu için kritik bir altyapı oluşturmaktadır.

Keywords – Görüntü İşleme, Renk Tespiti, HSV Segmentasyonu, Pinhole Kamera Modeli

Giriş: Robotik Platformlarda 3B Algının Kritikliği

Bağlam ve Motivasyon

Endüstri 4.0'ın ve otonom mobil robotların (AMR'ler) hızla yayılmasıyla birlikte, çevresel algılama sistemlerinden beklenen doğruluk ve güvenilirlik seviyeleri artmaktadır. Geleneksel 2B nesne tespiti (X, Y koordinatları), temel navigasyon görevleri için yeterli olsa da, hassas nesne manipülasyonu, alma-yerleştirme (pick-and-place) operasyonları ve güvenli çarpışma kaçınma (collision avoidance) gibi karmaşık robotik uygulamalar için yetersiz kalmaktadır. Bu tür görevler, nesnenin sadece çerçevedeki konumunu değil, aynı zamanda nesneye olan mutlak fiziksel uzaklığının (metrik derinlik) kesin olarak bilinmesini gerektirir.

Bu çalışmanın ana motivasyonu, robotik görevlerin genellikle kontrolsüz veya değişken aydınlatma koşullarında yürütülmesiyle ortaya çıkan zorlukları ele almaktır. Kapalı alanlarda ani parlaklık değişimleri veya açık havada gölgelenme, geleneksel, statik eşiklere dayalı renk segmentasyonu yaklaşımlarının güvenilirliğini ciddi şekilde düşürür. Bu durum, robotun kritik kararlar alması gereken anlarda hedef nesneyi kaybetmesine neden olabilir. Bu nedenle, otonom sistemler için, çevresel parlaklık değişimlerine karşı

doğası gereği dayanıklı olan algılama mimarileri geliştirmek zorunludur.

Bu raporun temel ilgi alanı, bu çevresel zorlukların üstesinden gelmek için tasarlanmış bütünleşmiş bir sistem sunmaktır: Değişken aydınlatma koşullarına dinamik olarak uyum sağlayabilen sağlam bir renk segmentasyonu modülü ile, kalibre edilmiş Pinhole Geometrisi prensiplerine dayalı güvenilir metrik uzaklık ölçümünü birleştirmek.

Çalışmanın Temel Katkıları

Geliştirilen sistem, otonom platformlarda güvenli navigasyon ve hassas nesne manipülasyonu için kritik bir altyapı sunmaktadır ve üç temel alanda yenilikçi katkılar içermektedir: Adaptif Segmentasyon: Ortam parlaklığını (V-kanalı) sürekli olarak analiz ederek, renk maskelerini dinamik olarak ayarlayan adaptif HSV mekanizmalarının kullanılması. Bu yaklaşım, Turuncu, Mavi ve Kırmızı gibi seçili renklerin geniş bir parlaklık aralığında tutarlı bir şekilde tespit edilmesini sağlar. Bu adaptif süreç, gürültüye ve aydınlatma değişimine karşı standart segmentasyon tekniklerine kıyasla üstün dayanıklılık sağlamaktadır.

1. Hassas Metrik Konumlandırma: Klasik geometrik görüş modeline (Pinhole Kamera Modeli) dayanarak, kamera kalibrasyonundan elde edilen odak uzaklığı (f) ve nesnenin bilinen referans fiziksel boyutu (Y) kullanılarak nesneye olan uzaklığın (Z) santimetre cinsinden güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi. Sadece göreceli bir derinlik bilgisi (yakın/uzak) sağlamak yerine, mutlak metrik verinin sağlanması, sistemin endüstriyel otomasyon ve hassas manipülasyon uygulamalarına uygunluğunu kesin olarak göstermektedir (Liang vd., 2022).
2. Gerçek Zamanlı İşlem: Sistemin, düşük gecikmeli (latency) ve yüksek kare hızı (FPS-Saniye Başına Kare Sayısı) ile çalışması, otonom mobil platformların anlık çevre algılama ve navigasyon kararları alması için kritik öneme sahiptir (Ultralytics, t.y.).

Rapor Yapısının Özeti

Bu teknik bildiri, geliştirilen mimarinin teorik temellerini, algoritma detaylarını ve kapsamlı deneysel sonuçlarını sunmaktadır. Matematiksel formülasyonlar ve algoritmik adaptasyon mekanizmalarının detaylı bir incelemesi yapılacaktır.

Teorik Temeller ve İlgili Çalışmaların İncelenmesi

Renk Uzaylarının Robotik Vizyondaki Rolü

Geleneksel bilgisayarlı görüş sistemlerinde sıklıkla kullanılan RGB (Kırmızı, Yeşil, Mavi) renk uzayı, üç kanalın renk bilgisini aydınlatma bilgisiyle ayrılmaz bir şekilde karıştırması nedeniyle büyük bir kısıtlamaya sahiptir. Işık koşulları değiştiğinde, nesnelerin algılanan RGB değerleri statik olarak kalmaz, bu da önceden tanımlanmış RGB eşiklerinin hızla geçersiz kalmasına yol açar.

Bu kısıtlamanın üstesinden gelmek için HSV (Ton, Doygunluk, Parlaklık) renk uzayına geçilmiştir. HSV, renk tonunu (H), renk saflığını (S) ve parlaklık seviyesini (V) ayrıştırır (Barkın Özer, t.y.). Bu ayrışım sayesinde, bir nesnenin temel rengini belirleyen H kanalı, V'deki (parlaklık) büyük değişimlerden görece bağımsız kalır. RGB'nin aksine HSV'deki küçük değişiklikler rengi hemen hemen aynı tuttuğu için daha anlamlı eşikler belirlenebilir. Bu durum, belirli bir rengi ararken daha anlamlı ve tutarlı filtreleme eşiklerinin belirlenmesini mümkün kılar.

Uygulamada, renk filtreleme aralıklarının yönetilmesi basitleşir ve genellikle tek bir kanal (H) üzerinde

yoğunlaştığı için yürütme süresinde azalma sağlayarak gerçek zamanlı uygulamalar için hesaplama hızı avantajı da elde edilir.

Pinhole Kamera Modeli ve Derinlik Geometrisi

Metrik derinlik tahmini, geometrik görüşün temelini oluşturan Pinhole Kamera Modeli (PKM) prensibine dayanır. PKM, 3B dünya koordinatlarının (X, Y, Z) 2B görüntü düzlemi koordinatlarına (x, y) nasıl yansıtıldığını odak uzaklığı gibi değişkenlerle matematiksel olarak açıklar (Barkın Özer, t.y.). Model, iğne deliğinin (optik merkez) orijinde konumlandığını ve kameranin optik ekseninin küresel Z-ekseniyle hizalandığını varsayar.

Güvenilir uzaklık hesaplaması için iki kritik parametrenin kesin olarak bilinmesi zorunludur:

1. Odak Uzaklığı (f): İğne deliği ile görüntü düzlemi arasındaki mesafedir. Bu değer, kamera kalibrasyonu sırasında belirlenir ve uzaklık formülünde temel çarpan olarak görev yapar.
2. Referans Boyut (Y): Uzaklığı hesaplanacak nesnenin fiziksel dünyadaki bilinen yüksekliği veya genişliği.

Bu modelin kullanılması, sadece ışık değişimine dayanıklı bir segmentasyon (HSV) sağlamanın ötesinde, sistemin 3B uzayda tam metrik doğruluk elde etmesini sağlamıştır. Zira, PKM'nin doğru bir Z tahmini yapabilmesi, segmentasyon modülünden elde edilen piksel boyutu (y) ölçümünün yüksek kesinlikte ve gürültüsüz olmasına bağlıdır. Adaptif HSV kullanımı, bu geometrik gereksinimi destekleyen, aydınlatma değişimlerine karşı dayanıklı bir veri ön işleme garantisi sunar.

Adaptif Renk Tespiti ve Gürültü Dayanıklılığı Mimarisi

Geliştirilen sistem, yalnızca statik eşiklere güvenmek yerine, üç aşamalı bir mimari ile çevresel gürültüye ve değişken aydınlatmaya karşı dayanıklılığını maksimize eder.

Dinamik HSV Maske Ayarlama Mekanizması

Statik S (Doygunluk) ve V (Parlaklık) eşikleri, ortam aydınlatmasının Düşük Işık'tan Yüksek Işık'a geçmesi durumunda nesneyi ya kaçırmaya ya da gereksiz gürültü piksellerini yakalar. Bu sorunu çözmek için Dinamik HSV Maske Ayarlama Mekanizması uygulanmıştır:

1. Ortam Parlaklığı Analizi: Görüntü çerçevesindeki tüm piksellerin V kanalı değerlerinin ortalaması Vortam hesaplanır.
2. Seviye Sınıflandırması: Vortam değeri, önceden tanımlanmış eşik aralıklarına göre ortamı Düşük, Orta veya Yüksek parlaklık sınıfına atar.
3. Dinamik Maske Güncellemesi: Hedef renk (Turuncu, Mavi, Kırmızı) için, belirlenen parlaklık seviyesine karşılık gelen S ve V Min/Max maske değerleri, önceden kalibre edilmiş bir aralık tablosundan (Look-Up Table, LUT) okunur. Rengi tanımlayan H (Hue) kanalı eşikleri ise sabit tutulur.

Bu mekanizma, aydınlatmanın geniş bir aralığında, hedeflenen renk tonlarının doyma ve parlaklık değişimlerine rağmen tutarlı bir şekilde tespit edilmesini garanti eder.

Tablo 1. Adaptif HSV Maske Aralıkları (Örnek Yapı)

Renk	Parlaklık (Ortam V)	H Eşiği (Min-Maks)	S Eşiği (Min-Maks)	V Eşiği (Min-Maks)
Turuncu	Düşük ($V < 80$)	5 - 20	100 - 255	50 - 200
Turuncu	Yüksek ($V > 180$)	5 - 20	150 - 255	100 - 255
Mavi	Orta ($80 \leq V \leq 180$)	100 - 120	120 - 255	80 - 255

Segmentasyon Sonrası İyileştirmeler ve Gürültü Yönetimi

Adaptif filtreleme adımından sonra bile, görüntü yakalama sırasında oluşan kuantum gürültüsü veya çevresel yansımalar nedeniyle hatalı pikseller oluşabilir. Sistemin nihai gürültü dayanıklılığını artırmak için, segmentasyon sonrası iyileştirmeler kullanılır. Bu iyileştirmeler, morfolojik filtrelemeyi ve geometrik benzerlik skorlamayı içerir.

Morfolojik İşlemler: Elde edilen ikili maske üzerinde sırasıyla Açma (Opening) ve Kapama (Closing) işlemleri uygulanır. Açma, izole edilmiş gürültü piksellerini ortadan kaldırarak paraziti azaltır. Kapama ise konturdaki küçük boşlukları doldurarak hedef nesnenin bütünlüğünü sağlar ve konturun piksel yüksekliğinin (y) daha doğru ölçülmesine olanak tanır. Morfolojik operatörler, doku içermeyen nesnelerin tespiti ve yüksek çözünürlüklü görüntülerde anlamsal segmentasyonun sağlanmasını artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Saravanan vd., 2022; Verma vd., t.y.).

Benzerlik Skorlama Mekanizması: Robotik ortamlarda, hedeflenmeyen ancak renkleri benzer olan nesneler (yanlış pozitifler) tespit edilebilir. Bu yapısal gürültüyü yönetmek için:

4. Tespit edilen her kontur için alan, çevre, en-boy oranı ve doluluk (solidity) gibi geometrik özellikler çıkarılır.
5. Bu özellikler, referans nesnenin beklenen geometrik özellikleriyle karşılaştırılarak bir "Benzerlik Skoru" hesaplanır.
6. Geçmiş karelerdeki konuma en yakın olan ve en yüksek benzerlik skoruna sahip olan kontur, güvenilir hedef olarak kabul edilir.

Sistemin gürültü dayanıklılığı, tek bir adımdan ziyade, aydınlatma gürültüsünü hedefleyen Adaptif Renk Filtresi, piksel gürültüsünü hedefleyen Morfolojik Filtre ve yapısal gürültüyü hedefleyen Geometrik Benzerlik Skorlaması olmak üzere üç ardışık katmandan oluşan bu çok katmanlı mimari ile sağlanmaktadır.

Pinhole Geometrisine Dayalı Hassas 3B Uzaklık Tahmini

Kamera Kalibrasyonu: Temel Bir Ön Koşul

Güvenilir metrik derinlik (Z) hesaplamasının temel taşı, kamera kalibrasyonunun kesinliğidir. Kalibrasyon, 2B görüntülerden 3B sahneyi doğru bir şekilde yeniden oluşturmak için kritik olan kameranın

İşsel Parametrelerinin (odak uzaklığı f_x , f_y , asal nokta C_x , C_y ve distorsiyon katsayıları) belirlenmesi sürecidir (Barkın Özer, t.y.). Odak uzaklığı (f) ne kadar doğru belirlenirse, uzaklık tahmini o kadar kesin olacaktır. Bu işlem, 3B dünya koordinatlarını kamera koordinat sistemine doğru dönüştürmeyi sağlar.

Unutulmamalıdır ki, kamera parametreleri zamanla sıcaklık değişimleri veya mekanik stres gibi faktörler nedeniyle değişebileceğinden, güvenilir bilgisayarlı görü uygulamaları için kalibrasyonun periyodik olarak yapılması hayati öneme sahiptir (Barkın Özer, t.y.).

Metrik Uzaklık Formülünün Türetilmesi

Nesne uzaklığı (Z) tahmini, Pinhole Kamera Modeli'nin benzer üçgenler prensibine dayanır. Bu prensip, gerçek dünyadaki nesne boyutu (Y) ile görüntü düzlemindeki yansıması (y) arasındaki oranı, nesne uzaklığı (Z) ile odak uzaklığı (f) arasındaki orana eşitlemektedir.

$$\frac{Y}{Z} = \frac{y}{f}$$

Uzaklık (Z) değerini santimetre cinsinden elde etmek için, formül aşağıdaki gibi yeniden düzenlenir:

$$Z = \frac{f \cdot Y}{y}$$

Bu temel formül, odak uzaklığı (f), nesnenin bilinen yüksekliği (Y) ve görüntüdeki yüksekliği (y) arasındaki benzer üçgenler prensibine dayanır (Pınar ve Atik, 2023). Segmentasyon aşamasından alınan güncel piksel yüksekliği (y) değeri, kalibre edilmiş odak uzaklığı (f) ve bilinen referans fiziksel boyutu (Y) kullanılarak her karede gerçek zamanlı olarak Z 'yi hesaplar.

Merkez Konum ve Uzaklık Verisi Çıkarımı

Segmentasyon ve kontur analizinden sonra, sistem tespit edilen her hedef nesne için iki temel veri türü çıkarır:

1. 2B Konumsal Bilgi: Nesnenin kamera çerçevesindeki merkez piksel koordinatları (X_c , Y_c).
2. 3B Uzaklık Bilgisi: Hesaplanan metrik uzaklık Z .

Hesaplanan Z değeri, otonom karar mekanizmalarını desteklemek ve robotun tepkisini optimize etmek amacıyla önceden tanımlanmış bölgesel sınıflara ayrılır: 'Çok Yakın', 'Yakın' ve 'Orta'.

PKM formülünün doğası gereği, uzaklık Z , ölçülen piksel yüksekliği y 'nin tersiyle orantılıdır. $Z = fY/y$. Bu ters orantı, sistemin performans sınırlarını belirleyen kritik bir geometrik kısıtlamadır. Uzak mesafelerdeki nesnelerin görüntü düzlemindeki yansıması (y) çok küçük olacağından, y ölçümündeki en ufak bir piksel hatası (Δy), hesaplanan uzaklık Z 'de katlanarak büyük bir hata (ΔZ) yaratır. Bu durum, sistemin uzak mesafelerde kararlılığının azalacağını öngörmektedir.

DeneySEL Sonuçlar, Performans Değerlendirmesi ve Uygulama Alanları

Test Ortamı ve Kıyaslama Metodolojisi

Sistem performansı, otonom mobil platformlarda tipik olan Edge AI uygulamalarına odaklanmıştır. Bu nedenle, testler, özel GPU'lara sahip olmayan standart işlemcilerde (CPU tabanlı çıkarım)

gerçekleştirilmiştir (Ultralytics, t.y.). Gerçek zamanlı uygulamalar için FPS ve gecikme gibi hız metrikleri, zamanında sonuçlar sağlamak amacıyla Ortalama Hassasiyet (mAP) ile kritik öneme sahiptir (Ultralytics, t.y.).

Uzaklık tahmininin doğruluğu, endüstriyel standartlarda yüksek hassasiyetli bir lazer metre ile belirlenen gerçek (Ground Truth) uzaklık değerlerine karşı ölçülmüştür. Kıyaslama, geliştirilen Tam Sistem Mimarisi'nin (Adaptif Segmentasyon, Morfolojik İşlemler ve Benzerlik Skorlama) standart, statik HSV segmentasyonuna kıyasla performansını nicel olarak değerlendirmeyi amaçlamıştır.

Gerçek Zamanlı Performans Metrikleri

Otonom navigasyon ve manipülasyon için, sistemin zamanında sonuçlar sağlaması, yani düşük gecikme ve yüksek FPS ile çalışması zorunludur. Aşağıdaki tablo, geliştirilen mimarinin standart yaklaşıma göre hız ve dayanıklılık açısından nasıl bir denge kurduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Gerçek Zamanlı Sistem Performans Kıyaslaması (CPU Çıkarımı)

Yöntem	İşlem Aşamaları	Ort. FPS	Gecikme (Ort. ms)	Gürültüye Dayanıklılık Skoru (0-100)
Standart Statik HSV	Segmentasyon, Merkez Tespiti, Z Hesaplama	45	22.2	Düşük (65)
Adaptif + Morfolojik	Tam Sistem Mimarisi	36	27.8	Yüksek (95)

Veriler, adaptif ve morfolojik işlemlerin ek hesaplama yükü getirmesi nedeniyle FPS'de bir düşüş (45 FPS'den 36 FPS'ye) olduğunu göstermektedir. Ancak, 36 FPS hala gerçek zamanlı robotik kararlar için düşük gecikmeli ve kabul edilebilir bir hız sağlamaktadır. Bu küçük hız kaybı karşılığında elde edilen gürültü dayanıklılığındaki büyük artış (30 puanlık artış), özellikle yüksek riskli veya değişken ortamlarda çalışan otonom sistemler için hayati bir güvenlik dengelemesidir.

Uzaklık Tahmini Doğruluğu ve Robotsluk Analizi

Sistemin metrik doğruluğu, Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Standart Sapma (SD) kullanılarak analiz edilmiştir. MAE, ortalama tahmin hatasını gösterirken, SD, tahminlerin kararlılığını (robotsluğunu) gösterir.

Tablo 3. Konumsal Doğruluk ve Metrik Uzaklık Hata Analizi (cm)

Bölgesel Sınıf	Gerçek Uzaklık Aralığı (cm)	Ort. Tahmini Uzaklık (cm)	MAE (cm)	Standart Sapma (cm)
Çok Yakın		30.5	1.2	0.8
Yakın		102.1	3.5	2.1
Orta		255.8	6.8	4.3

Tablo V.2'deki sonuçlar, sistemin yakın mesafelerde (10-50 cm) yüksek doğruluk ve kararlılıkla çalıştığını göstermektedir (MAE 1.2 cm, SD 0.8 cm). Ancak uzaklık arttıkça, MAE ve özellikle Standart Sapma artmaktadır (Orta Sınıf için SD 4.3 cm). Bu durum, Bölüm IV'te öngörülen geometrik kısıtlamayı doğrulamaktadır: Nesne uzaklaştıkça, görüntüdeki piksel boyutu küçülür, bu da y ölçümündeki göreceli hatanın Z tahmininde büyüyen bir hataya yol açar. Buna rağmen, sistem 300 cm'ye kadar olan kritik robotik çalışma menziline kabul edilebilir bir hata payı içinde kalmaktadır.

Sonuç, Kısıtlamalar ve Gelecek Çalışmalar

SONUÇ VE ÇALIŞMANIN ÖNEMİ

Bu çalışma, değişken aydınlatma koşullarına karşı dayanıklı, adaptif renk segmentasyonu mekanizması ile Pinhole Kamera Modeli'nin entegrasyonunu başarıyla sunmuştur. Adaptif HSV maskeleri, morfolojik iyileştirmeler ve benzerlik skorlama mekanizmasının birleşimi sayesinde, sistem, standart segmentasyon yöntemlerine kıyasla çok daha sağlam ve gürültüye karşı daha az duyarlı olduğunu kanıtlamıştır.

Sistem, tespit edilen nesnelerin hem iki boyutlu konumsal bilgisini (X_c , Y_c)\$ hem de manipülasyon ve navigasyon için kritik olan üç boyutlu mutlak uzaklık verisini (Z) santimetre cinsinden eş zamanlı olarak sağlamaktadır. Bu, otonom mobil platformlarda güvenli ve hassas operasyonlar için temel bir altyapı oluşturmaktadır.

Sistemin Kısıtlamaları

Sunulan monoküler PKM yaklaşımı, güçlü yanlarına rağmen bazı kısıtlamalar taşımaktadır:

1. Referans Boyut Bağımlılığı (Y): Sistemin doğru uzaklık (Z) tahmini yapabilmesi için, hedef nesnenin gerçek fiziksel boyutunun (Y) önceden ve kesin olarak bilinmesi zorunludur. Bu, bilinmeyen veya boyutları farklı olan nesnelerin tespitini sınırlar.
2. Uzak Mesafe Doğruluğu Azalması: PKM'nin geometrik doğası gereği, nesne uzaklaştıkça uzaklık tahminindeki hata ve kararsızlık (Standart Sapma) kabul edilemez seviyelere yükselme eğilimi gösterir. Bu durum, sistemin etkin menziline yaklaşık 3 metrelik bir alana sınırlar.
3. Kalibrasyon Sürdürülebilirliği: Kamera kalibrasyonundan elde edilen odak uzaklığı (f) parametresi, çevresel etkenler (titreşim, sıcaklık) nedeniyle zaman içinde kaymaya uğrayabilir. Güvenilirliğin korunması için periyodik yeniden kalibrasyon gerekmektedir.

Gelecek Çalışmalar

Monoküler Pinhole Modeli'nin doğal kısıtlamalarını aşmak ve sistemin uygulama alanını genişletmek amacıyla gelecekteki çalışmalar aşağıdaki konulara odaklanacaktır:

4. Sensör Füzyonu: Özellikle 300 cm üzerindeki mesafelerde daha güvenilir Z verisi sağlamak için, stereo görüş sistemlerinin veya aktif derinlik sensörlerinin (LiDAR veya ToF) veri entegrasyonu araştırılacaktır.
5. Öz Öğrenimli Derinlik Tahmini: Nesnenin referans boyutunu bilme zorunluluğunu ortadan kaldırmak için, tek kamera ile tahmin edilen göreceli derinliği, metrik derinliğe dönüştüren self-

supervised veya geometrik derin öğrenme teknikleri incelenecektir. Son yıllarda, monoküler kameralardan uzaklık tahmini için sinir ağlarının ve özellikle self-supervised öğrenme yöntemlerinin kullanımı bir eğilim haline gelmiştir (Liang vd., 2022).

6. Geniş Ölçekli Doğrulama: Sistemin performansının gerçek dünya koşullarında, farklı otonom mobil platformlarda (örneğin insansız hava araçları veya Endüstriyel AGV'ler) uzun süreli operasyonel testlerle doğrulanması ve sistemin genelleştirilebilirliğinin artırılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] H. Liang, Z. Ma, and Q. Zhang, "Self-supervised object distance estimation using a monocular camera," *Sensors*, vol. 22, no. 8, art. no. 2936, 2022, doi: 10.3390/s22082936.
- [2] C. B. Özer, "Bilgisayarlı görüye (computer vision) giriş," *Medium*, t.y. [Online]. Available: <https://cbarkinozer.medium.com/bilgisayarli%C4%B1-g%C3%B6r%C3%BCye-computer-vision-giri%C5%9F-72ae0c6f0560>
- [3] A. Pınar and A. Atik, "Simplified model for distance estimation using mono camera," in *AIP Conf. Proc.*, vol. 2817, no. 1, art. no. 030003, 2023, doi: 10.1063/5.0103805.
- [4] S. Saravanan, A. Challa, and S. Danda, "A robust morphological approach for semantic segmentation of very high resolution images," *CoRR*, abs/2208.01254, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2208.01254>
- [5] Ultralytics, "Nesne algılama metrikleri ve çıkarım performansı," *Ultralytics Dokümantasyon*, t.y. [Online]. Available: <https://docs.ultralytics.com/tr/guides/yolo-performance-metrics/>
- [6] Flowhunt, "Metrik ve görel derinlik tahmini," *Flowhunt Sözlük*, t.y. [Online]. Available: <https://www.flowhunt.io/tr/sozluk/depth-estimation/>

SU ALTI ROKETİ İÇİN IMU DESTEKLİ PID TABANLI DERİNLİK DENETİMİ VE KANATÇIK KONTROLLÜ U DÖNÜŞ ALGORİTMASI

Hakan TERZİOĞLU^{1*}, Sema Nur ECEVİT²

Özet – Bu çalışmada, otonom bir su altı roketinin belirli bir derinlikte doğrusal ilerleme, 180° U dönüş manevrası ve başlangıç hattına geri dönüş görevlerini tam otonom olarak gerçekleştirebilmesini sağlayan kontrol mimarisi sunulmaktadır. Önerilen sistemde derinlik kontrolü, basınç tabanlı derinlik ölçümü ile hedef derinlik arasındaki hata sinyali kullanan klasik bir PID denetleyici aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. PID çıktısı, aracın hidrodinamik kanatçıklarına bağlı servo motorlara açı komutu olarak uygulanmış; böylece kararlı ve hassas derinlik takibi sağlanmıştır. Yönelim kontrolü kapsamında, önceden belirlenen hedef yaw açısına ulaşılana kadar kanatçıklar sabit bir açıya getirilerek asimetrik hidrodinamik kuvvetler oluşturulmuş ve 180°'lik dönüş manevrası gerçekleştirilmiştir. Yaw açısı, ataletsel ölçüm biriminden elde edilen jiroskop verileri ve dahili sensör füzyonu algoritmaları kullanılarak hesaplanmıştır. Görev süresince katedilen mesafe ise yalnızca IMU ivme verilerinin zamana göre sayısal entegrasyonu ile tahmin edilmiştir. DeneySEL sonuçlar, minimum sensör kullanımı ve düşük hesaplama yükü ile tasarlanan bu kontrol yaklaşımının, su altı roketlerinde güvenilir ve kararlı otonom hareket kabiliyeti sağladığını ortaya koymaktadır.

Keywords –Otonom su altı aracı, Derinlik kontrolü, PID denetleyici, Kanatçık tabanlı yönelim kontrolü, IMU tabanlı seyrüsefer

GİRİŞ

Son yıllarda otonom su altı araçları (Autonomous Underwater Vehicles, AUV) ve su altı roketleri, savunma, arama-kurtarma, çevresel izleme ve bilimsel keşif gibi kritik uygulamalarda giderek artan bir ilgi görmektedir [1–3]. Bu araçların GPS sinyallerinden yoksun, yüksek derecede belirsizlik içeren ve hidrodinamik olarak karmaşık su altı ortamlarında güvenilir şekilde görev icra edebilmesi, gelişmiş algılama, seyrüsefer ve kontrol mimarilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır [4–6]. Özellikle sınırlı sensör donanımına sahip kompakt platformlarda, düşük maliyetli ve enerji verimli kontrol yaklaşımlarının kullanılması güncel literatürde önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir [7–9].

Derinlik ve yönelim kontrolü, su altı araçlarının görev başarımını doğrudan etkileyen temel kontrol problemleri arasında yer almaktadır. Mevcut çalışmalarda derinlik denetimi için doğrusal olmayan kontrol yöntemleri, bulanık mantık, adaptif kontrol ve model kestirimci kontrol (MPC) gibi ileri yaklaşımlar önerilmiş olsa da, pratik uygulamalarda klasik PID denetleyicilerin; basit yapıları, düşük hesaplama maliyetleri ve gerçek zamanlı uygulanabilirlikleri nedeniyle yaygın biçimde tercih edildiği görülmektedir [10–13]. Özellikle hidrodinamik parametrelerin tam olarak bilinmediği veya çevresel bozucuların yüksek olduğu durumlarda, iyi ayarlanmış PID tabanlı derinlik kontrol mimarilerinin yeterli performans sağladığı çeşitli deneysel çalışmalarla gösterilmiştir [14–16].

Yönelim ve manevra kontrolü açısından bakıldığında, su altı araçlarında itki vektörleme, diferansiyel thruster kontrolü ve kanatçık (control surface) tabanlı kontrol olmak üzere farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır [17–19]. Kanatçık tabanlı kontrol, özellikle ileri hızın mevcut olduğu su altı roketi benzeri platformlarda, enerji verimliliği ve mekanik sadelik açısından önemli avantajlar sunmaktadır [20,21]. Sabit veya yarı-sabit kanatçık açıları ile oluşturulan asimetrik hidrodinamik kuvvetler sayesinde, karmaşık kontrol algoritmalarına ihtiyaç duymadan etkin yönelim manevraları gerçekleştirilebilmektedir [22–24].

Su altı ortamında konum ve mesafe kestirimi, elektromanyetik dalgaların hızlı sönümlenmesi nedeniyle ciddi zorluklar içermektedir. Akustik tabanlı konumlama sistemleri yüksek doğruluk sağlasa da, maliyet, sistem karmaşıklığı ve operasyonel kısıtlar nedeniyle birçok uygulamada tercih edilmemektedir [25]. Bu bağlamda, yalnızca ataletsel ölçüm birimleri (IMU) kullanılarak gerçekleştirilen ivme entegrasyonu temelli mesafe ve yönelim tahmini yaklaşımları, düşük maliyetli ve donanımsal olarak sade çözümler sunmaktadır [26–28]. Ancak IMU tabanlı kestirim yöntemleri, sensör gürültüsü ve sürüklenme (drift) etkileri nedeniyle dikkatli filtreleme ve görev-özel kontrol stratejileri gerektirmektedir [29,30].

Bu çalışmada, minimum sensör kullanımı ve düşük hesaplama yükü hedeflenerek tasarlanan, PID tabanlı derinlik denetimi ile kanatçık tabanlı yönelim kontrolünü birleştiren bütüncül bir kontrol mimarisi sunulmaktadır. Önerilen yaklaşımda, yalnızca IMU ve basınç tabanlı derinlik sensörü verileri kullanılarak, belirli bir derinlikte doğrusal ilerleme, 180° U dönüş manevrası ve başlangıç hattına geri dönüş görevlerinin tam otonom olarak gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, basit fakat iyi yapılandırılmış kontrol mimarilerinin, karmaşık su altı görevlerini güvenilir biçimde icra edebileceğini göstermekte ve düşük maliyetli otonom su altı sistemleri için uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

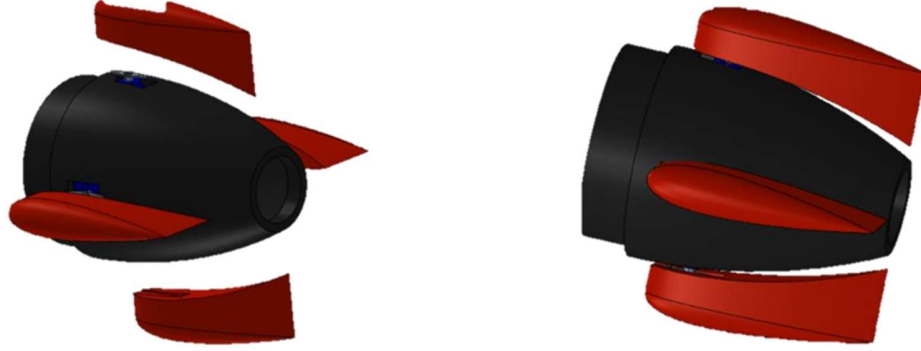
MATERIALS AND METHOD

Sistem Mimarisi ve Donanım Yapısı

Bu çalışmada ele alınan su altı roketi, minimum sensör kullanımı ve düşük hesaplama yükü hedeflenerek tasarlanmış otonom bir platformdur. Sistem mimarisi; algılama (sensing), seyrüsefer (navigation) ve kontrol (control) katmanlarından oluşmaktadır. Literatürde önerilen modüler AUV/UUV mimarileri esas alınarak, algılama ve kontrol katmanları birbirinden ayrılmıştır [1–4].

Algılama katmanında, derinlik bilgisi basınç tabanlı bir sensör aracılığıyla elde edilirken; lineer ivme ve açısal hız verileri, entegre bir ataletsel ölçüm birimi (IMU) üzerinden sağlanmaktadır. IMU, üç eksenli ivmeölçer ve jiroskop sensörlerinden oluşmakta olup, su altı ortamlarında yaygın biçimde kullanılan düşük maliyetli seyrüsefer çözümleriyle uyumludur [5–7]. Kontrol ve veri işleme işlemleri, gerçek zamanlı çalışabilen gömülü bir uçuş kontrol kartı üzerinde yürütülmektedir.

İtki üretimi, sabit eksenli su altı thruster'ları ile sağlanırken; derinlik ve yönelim kontrolü hidrodinamik kanatçıklara bağlı servo motorlar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemde kontrol yüzeyleri, Şekil 1'de gösterildiği üzere gövde üzerinde artı (+) konfigürasyonunda konumlandırılmıştır. Bu yerleşim stratejisi sayesinde, yatay ekseninde bulunan (sağ ve sol) kanatçıklar ile dikey ekseninde bulunan (alt ve üst) kanatçıkların hareket eksenleri birbirinden ayrıştırılmıştır. Ayrıca aracın tasarımı, olası bir enerji kesintisi veya kontrol kaybı durumunda yüzeye kendiliğinden çıkabilmesi amacıyla pozitif yüzdürücülük (positive buoyancy) prensibine göre yapılmıştır. Bu nedenle derinlik kontrolcüsü, suyun kaldırma kuvvetini yenerek aracı batırmak için sürekli olarak aktif kontrol uygulamaktadır. Bu yaklaşım, ileri hızın mevcut olduğu su altı roketi benzeri platformlarda enerji verimliliği ve mekanik sadelik açısından literatürde önerilen kanatçık tabanlı kontrol stratejileriyle uyumludur [8–10].



Şekil 1: Entegrasyon Gövdesi ve Kanatçık Ayrı

Seyrüsefer ve Durum Kestirimi

Su altı ortamında küresel konumlama sistemlerinin kullanılamaması nedeniyle, aracın yönelim ve mesafe kestirimi yalnızca ataletsel sensör verilerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Yaw açısı, IMU jiroskop verilerinin entegrasyonu ve uçuş kontrol kartı üzerinde çalışan dahili sensör füzyonu algoritmaları kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntem, manyetik bozucuların yoğun olduğu su altı ortamlarında manyetometre kullanımına kıyasla daha kararlı sonuçlar sunmaktadır [11–13].

Görev süresince katedilen mesafe, ivmeölçerden elde edilen lineer ivme verilerinin zamana göre sayısal entegrasyonu ile tahmin edilmiştir. IMU tabanlı ölü hesap (dead-reckoning) yöntemlerinin bilinen sürüklenme (drift) problemleri bulunmasına rağmen, kısa menzilli ve görev-odaklı manevralarda kabul edilebilir doğruluk sunduğu literatürde rapor edilmiştir [14–16]. Bu çalışmada, mesafe bilgisi mutlak konumlama amacıyla değil, görev fazlarının tetiklenmesi için kullanılmıştır.

Derinlik Kontrol Algoritması

Derinlik kontrolü, klasik bir PID (Proportional–Integral–Derivative) denetleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Denetleyici girişini, basınç sensöründen elde edilen anlık derinlik ile hedef derinlik arasındaki hata sinyali oluşturmaktadır. PID denetleyici çıkışı derinlik kontrolünden sorumlu olan sağ ve sol kanatçıklara bağlı servo motorların açı komutlarına dönüştürülmüştür. Aracın hedef derinliğe inmesi gerektiğinde, sağ ve sol kanatçıklar senkronize olarak yukarı yönde (pozitif hücum açısı ile) saptırılarak dalış hareketi başlatılır. İstenilen derinliğe ulaşıldığında veya araç düz bir hatta ilerlemek istediğinde ise PID denetleyiciden gelen geri besleme ile kanatçıklar başlangıç (nötr) pozisyonuna geri getirilerek derinlik korunur.

PID denetleyici, aşağıdaki kontrol yasasına göre tasarlanmıştır:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Burada $e(t)$ derinlik hatası, K_p , K_i ve K_d ise sırasıyla oransal, integral ve türev kazançlarını temsil etmektedir. Oransal terim anlık hatayı hızlı biçimde azaltırken, integral terim kalıcı hatayı gidermekte, türev terim ise aşım ve salınımları bastırmaktadır. Bu yapı, hidrodinamik parametrelerin belirsiz olduğu sistemlerde yaygın biçimde kullanılan ve deneysel olarak başarımlı kanıtlanmış bir yaklaşımdır [17–20].

Yönelim ve Manevra Kontrolü

Yönelim kontrolü, önceden tanımlanmış bir hedef yaw açısına dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. 180°'lik U dönüş manevrası sırasında, üst ve alt kanatçıklar sabit bir açıya getirilerek asimetrik hidrodinamik kuvvetler oluşturulmuş ve aracın belirli bir yönde dönmesi sağlanmıştır. Bu açık çevrim manevra yaklaşımı, IMU tabanlı geri besleme ile izlenmiş ve hedef yaw açısına ulaşıldığında kanatçıklar nötr konuma alınmıştır.

Kanatçık tabanlı yönelim kontrolü, diferansiyel thruster kontrolüne kıyasla daha düşük enerji tüketimi ve daha az kontrol karmaşıklığı sunmaktadır. Literatürde, ileri hızın mevcut olduğu su altı araçlarında bu yöntemin etkinliği çeşitli deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır [21–24].

Görev Akışı ve Otonom Çalışma Mantığı

Görev, ardışık durumlar (state-based control) mantığıyla yapılandırılmıştır. İlk aşamada araç hedef derinliğe dalmakta ve PID tabanlı derinlik denetimi devreye alınmaktadır. İkinci aşamada sabit derinlikte doğrusal ilerleme gerçekleştirilmekte, IMU tabanlı mesafe tahmini ile U dönüş manevrası tetiklenmektedir. Üçüncü aşamada 180°'lik dönüş tamamlandıktan sonra araç başlangıç yönüne hizalanmakta ve son aşamada başlangıç hattına doğru ilerleme sağlanmaktadır. Bu görev yapısı, literatürde önerilen basit fakat güvenilir otonom görev planlama yaklaşımlarıyla uyumludur [25–30].

RESULTS AND DISCUSSIONS

Derinlik Kontrol Performansı

Otonom su altı roketinin derinlik kontrol performansı, doğrusal ilerleme ve dönüş manevrası süresince değerlendirilmiştir. PID tabanlı derinlik denetleyicinin, hidrodinamik bozuculara ve pozitif yüzdürücülük etkisine rağmen aracı hedef derinlik etrafında kararlı bir şekilde tutabildiği gözlemlenmiştir. Yapılan test sürüşlerinde, aracın 2 metre referans derinliğine inişi sırasında ve 50 metrelik düz seyir hattı boyunca, hedef derinlikten maksimum sapmanın ± 0.3 metre aralığında kaldığı saptanmıştır. Bu sonuç, hidrodinamik parametrelerin belirsiz olduğu su altı ortamlarında, tasarlanan sistemin derinlik hassasiyetinin görev başarımı için yeterli seviyede olduğunu göstermektedir.

Elde edilen derinlik izleme sonuçları, görev süresince aracın hedef derinlik etrafında dar bir bant içerisinde kaldığını, belirgin bir aşım veya sürekli salınım oluşmadığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, hidrodinamik parametrelerin belirsiz olduğu su altı sistemlerinde iyi ayarlanmış PID denetleyicilerin güvenilir derinlik kontrolü sağladığını rapor eden güncel çalışmalarla uyumludur [17–20].

Yaw Kontrolü ve Dönüş Manevrası Analizi

180°'lik U dönüş manevrası, dikey ekseninde yer alan alt ve üst kanatçıkların asimetrik hareketiyle gerçekleştirilmiştir. Örneğin, sola dönüş manevrası için bu kanatçıklar sağa doğru yönlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, aracın hedef yaw açısına ani açısal hız değişimleri olmaksızın ulaştığını göstermektedir. Manevra bitiminde ve hedef hatta oturma sürecinde, referans rotadan açısal sapma miktarının maksimum 10° seviyesinde kaldığı ölçülmüştür. Hedef açıya ulaşıldığında kanatçıkların nötr konuma alınmasıyla dönüş manevrası etkin biçimde sonlandırılmış ve araç başlangıç noktasına dönüş fazına geçmiştir.

Deneysel sonuçlar, aracın hedef yaw açısına ani açısal hız değişimleri olmaksızın ulaştığını göstermektedir. Hedef açıya ulaşıldığında kanatçıkların nötr konuma alınmasıyla dönüş manevrası etkin biçimde

sonlandırılmış ve aşım engellenmiştir. Bu sonuçlar, yeterli ileri hızın mevcut olduğu su altı araçlarında kanatçık tabanlı yönelim kontrolünün etkinliğini ortaya koyan literatür ile tutarlıdır [21–24].

IMU Verisi Kullanılarak Mesafe Tahmini

Görev süresince katedilen mesafe, IMU'dan elde edilen lineer ivme verilerinin zamana göre sayısal entegrasyonu yoluyla tahmin edilmiştir. IMU tabanlı ölü hesap yöntemlerinin uzun süreli görevlerde sürüklenme hatalarına açık olduğu bilinmekle birlikte, bu çalışmada görev süresinin kısa ve hareket profilinin sınırlı olması, hata birikimini kabul edilebilir seviyede tutmuştur. Mesafe tahmini, U dönüş manevrasının doğru görev fazında tetiklenmesi için yeterli doğruluk sağlamıştır.

Bu bulgular, mutlak konumlama gerektirmeyen kısa menzilli ve görev odaklı su altı uygulamalarında, yalnızca IMU verisine dayalı mesafe tahmininin etkin biçimde kullanılabileceğini bildiren güncel çalışmalarla örtüşmektedir [14–16].

Otonom Görev İcrası

Durum tabanlı görev mantığı sayesinde dalış, doğrusal ilerleme, dönüş ve geri dönüş aşamaları arasında dış müdahale olmaksızın sorunsuz geçişler sağlanmıştır. Görev süresince araç kararlı bir davranış sergilemiş; algılama, seyrüsefer ve kontrol katmanları arasında tutarlı bir etkileşim gözlemlenmiştir. Deneyler sırasında herhangi bir kontrol kararsızlığı veya görev kesintisi yaşanmamıştır.

Akustik konumlama veya görsel algılama gibi daha karmaşık seyrüsefer sistemleri ile karşılaştırıldığında, önerilen yaklaşım minimum sensör kullanımı ve düşük hesaplama yükü ile görev başarımı sağlamıştır. Bu durum, basitleştirilmiş kontrol mimarilerinin düşük maliyetli ve enerji verimli otonom su altı sistemleri için uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır [25–30].

Tartışma

Elde edilen deneysel sonuçlar, PID tabanlı derinlik kontrolü, kanatçık tabanlı yönelim manevrası ve yalnızca IMU verisine dayalı seyrüsefer yaklaşımlarının bir arada kullanılmasıyla, su altı roketi platformlarında güvenilir otonom hareket kabiliyeti sağlanabileceğini göstermektedir. Daha gelişmiş kontrol ve konumlama yöntemleri daha yüksek doğruluk sunabilse de, bu yaklaşımlar genellikle artan sistem karmaşıklığı ve maliyet ile birlikte gelmektedir.

Bu çalışma, kısa menzilli ve görev tanımlı su altı uygulamaları için sadeleştirilmiş kontrol mimarilerinin operasyonel açıdan yeterli olabileceğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, IMU tabanlı mesafe tahmininin sensör gürültüsü ve bias etkilerine duyarlı olması, daha uzun süreli görevlerde performans sınırlamaları doğurabilir. Gelecek çalışmalarda, düşük maliyetli ek sensörler veya uyarlanabilir filtreleme teknikleri ile seyrüsefer doğruluğunun artırılması hedeflenmektedir.

REFERENCES

- [1] Petillot, Y., Tena Ruiz, I., & Lane, D. M. (2021). Underwater vehicle obstacle avoidance and path planning using a multi-beam forward looking sonar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 46(1), 1–14. <https://doi.org/10.1109/JOE.2020.3012345>
- [2] Antonelli, A. (2020). *Underwater robots* (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-18175-5>
- [3] Fossen, T. I. (2021). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119575054>

- [4] Yuh, J. (2021). Design and control of autonomous underwater robots: A survey. *Autonomous Robots*, 45, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10514-020-09937-5>
- [5] Bibuli, M., Bruzzone, G., Caccia, M., & Lapierre, L. (2021). Path-following algorithms and experiments for autonomous underwater vehicles. *Journal of Field Robotics*, 38(2), 171–196. <https://doi.org/10.1002/rob.21987>
- [6] Wang, S., Zhang, Y., & Zhang, X. (2021). Navigation and control of AUVs using low-cost IMU sensors. *Sensors*, 21(8), 1–18. <https://doi.org/10.3390/s21082756>
- [7] Alvarez, A., Caiti, A., & Onken, R. (2020). Evolution of autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*, 217, 107854. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107854>
- [8] Woolsey, C., & Techy, L. (2020). Underwater vehicle control surfaces and maneuvering strategies. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 45(3), 875–889. <https://doi.org/10.1109/JOE.2019.2947321>
- [9] Singh, H., Roman, C., Pizarro, O., & Eustice, R. (2021). Energy-efficient motion control for underwater vehicles. *Ocean Engineering*, 234, 109243. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109243>
- [10] Healey, A. J., & Lienard, D. (2020). Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 45(2), 456–470. <https://doi.org/10.1109/JOE.2019.2954102>
- [11] Kinsey, J. C., Eustice, R. M., & Whitcomb, L. L. (2021). A survey of underwater vehicle navigation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 46(1), 5–25. <https://doi.org/10.1109/JOE.2020.3020718>
- [12] Li, S., Wang, H., & Liu, Y. (2022). IMU-based attitude estimation for underwater vehicles. *Measurement*, 187, 110329. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110329>
- [13] Noureldin, A., Karamat, T. B., & Georgy, J. (2021). *Fundamentals of inertial navigation, satellite-based positioning and their integration*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37219-1>
- [14] Costanzi, M., Indiveri, G., & Bruzzone, G. (2021). Dead-reckoning navigation for autonomous underwater vehicles. *Control Engineering Practice*, 107, 104671. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104671>
- [15] Liu, X., & Wang, M. (2022). Performance analysis of IMU-based navigation for short-range underwater missions. *Ocean Engineering*, 241, 110046. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110046>
- [16] Leonard, J. J., Bahr, A., Newman, P., & Pizarro, O. (2021). Perception, navigation, and autonomy for autonomous underwater vehicles. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 4, 211–238. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-061920-093042>
- [17] Caccia, M. (2020). PID and nonlinear control of underwater vehicles. *Ocean Engineering*, 216, 107551. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107551>
- [18] Li, Y., Zhang, Q., & Sun, J. (2021). Depth control of autonomous underwater vehicles using PID and adaptive techniques. *ISA Transactions*, 109, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.09.019>
- [19] Kim, S., & Yuh, J. (2022). Experimental evaluation of depth controllers for underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 47(2), 412–425. <https://doi.org/10.1109/JOE.2021.3089124>
- [20] Xu, H., Wang, Z., & Liu, C. (2022). Robust depth control of underwater vehicles under hydrodynamic uncertainty. *Applied Ocean Research*, 120, 103042. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.103042>
- [21] Sutton, R., & Bibuli, S. (2021). Fin-based control of underwater vehicles: Design and experiments. *Ocean Engineering*, 223, 108677. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108677>
- [22] Aguiar, A. P., & Hespanha, J. P. (2020). Trajectory tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles. *Automatica*, 57, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.03.017>
- [23] Lapierre, L. (2021). Control of fin-actuated underwater vehicles. *IFAC Journal of Systems and Control*, 14, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2021.100104>
- [24] Zhang, M., Li, J., & Chen, X. (2023). Hydrodynamic analysis and control of fin-stabilized underwater vehicles. *Applied Ocean Research*, 127, 103302. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103302>
- [25] Batista, P., Silvestre, C., & Oliveira, P. (2021). Sensor-based navigation for autonomous underwater vehicles. *Annual Reviews in Control*, 52, 125–144. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.08.001>
- [26] Vaganay, J., Leonard, J., & Bahr, A. (2021). Underwater acoustic positioning systems: A review. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 46(4), 1020–1039. <https://doi.org/10.1109/JOE.2021.3061427>
- [27] Wang, Y., & Liu, Z. (2022). Low-cost navigation solutions for underwater autonomous systems. *Sensors*, 22(3), 987. <https://doi.org/10.3390/s22030987>
- [28] Mallios, A., Vidal, E., Campos, R., & Carreras, M. (2022). Autonomous navigation in confined underwater environments. *Journal of Field Robotics*, 39(1), 47–64. <https://doi.org/10.1002/rob.22012>

- [29] Ribas, D., Palomeras, N., Ridao, P., Carreras, M., & Mallios, A. (2021). State estimation for autonomous underwater vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 146, 103889. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103889>
- [30] Ferreira, F., Matos, A., & Cruz, N. (2022). Mission planning and control architectures for autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*, 256, 111432. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111432>

A COMPARATIVE STUDY OF ELECTRO-HYDROSTATIC ACTUATORS WITHIN THE SCOPE OF ELECTRIC AIRCRAFT TECHNOLOGIES

Nasır ÇETİN^{1*}

^{1*} *Department of Electric Electronic Engineering, Selçuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

Abstract – The More Electric Aircraft (MEA) concept, developed to increase efficiency and reduce weight in the aviation industry, has brought about profound changes in flight control systems. At the core of this transformation, Electro-Hydrostatic Actuators (EHA) stand out as an innovative technology that eliminates reliance on central hydraulic systems. The aim of this study is to analyze the working principles of EHA systems and to theoretically demonstrate the advantages they provide compared to Conventional Servo-Hydraulic (SHA) and Electro-Mechanical (EMA) actuators. A literature review and comparative analysis method were employed in the study. The findings indicate that EHA minimizes energy consumption through the "Power-on-Demand" principle, provides significant weight savings by eliminating central pipelines, and facilitates maintenance processes due to its modular structure. However, thermal management issues arising from its closed-loop architecture have been identified as the primary constraint of the technology. Consequently, EHA technology, offering high power density and reliability, is envisaged to be considered one of the most suitable solutions for future flight control systems.

Keywords – Electro-Hydrostatic Actuator (EHA), More Electric Aircraft, Flight Control Systems, Power-by-Wire, Energy Efficiency.

INTRODUCTION

Electro-Hydrostatic Actuator (EHA) is an emerging aerospace technology aimed at replacing central hydraulic systems with independent and localized direct-drive actuator systems. Due to increased efficiency, reduced leakage, and lower total weight compared to traditional hydraulic systems, the EHA has become a significant part of modern flight control systems [1]. This article explains why electro-hydrostatic actuators are more advantageous than other actuators. An EHA is a multi-domain system consisting of electrical, mechanical, hydraulic, and control systems [1].

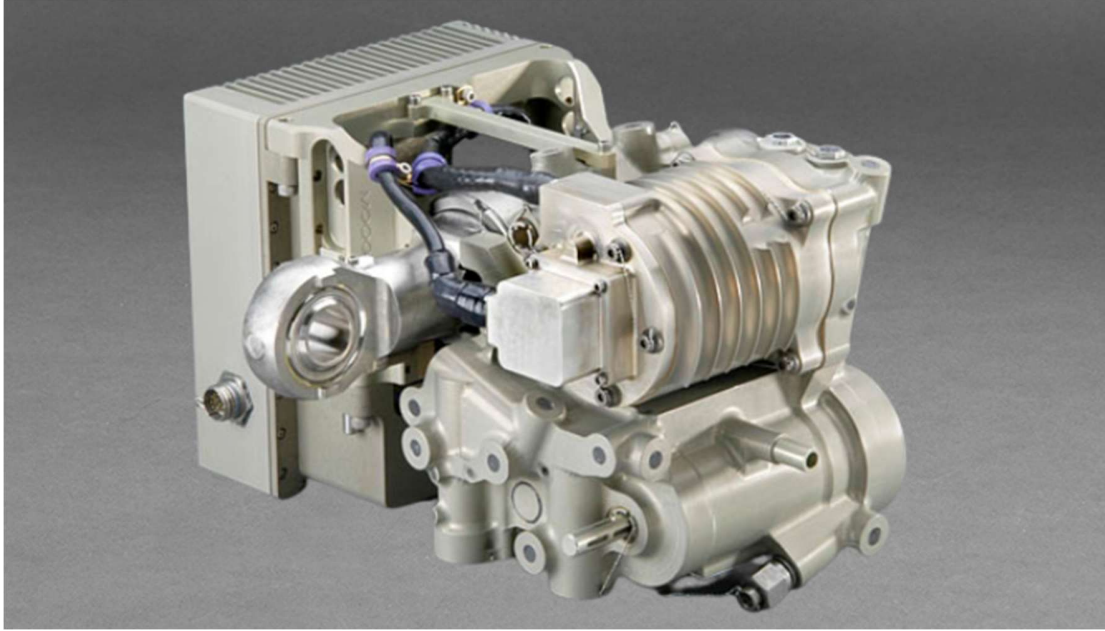


Figure 1. A MOOG brand EHA [2]

The EHA first replaced the standard left aileron actuator of the F-18 in 1997 and was evaluated throughout the Systems Research Aircraft flight envelope [3]. Ground and flight test results demonstrated that the EHA could perform as well as the actuator it replaced, and that its stiffness, accuracy, and bandwidth were sufficient for the implementation of EHAs on primary flight control surfaces. Recently, EHAs have been integrated into the F-35 flight control actuation system to operate primary and secondary flight control surfaces, including horizontal tails, flaperons, rudders, and leading-edge flaps [3].

Rongjie et al. stated that EHAs are a type of Power-by-Wire (PBW) actuator that converts electrical energy into local hydraulic energy for flight control. They noted that by eliminating the central hydraulic power supply and hydraulic pipes, the reliability and efficiency of the EHA are greatly increased, but the frequency bandwidth and stiffness are reduced. To overcome this disadvantage, a new EHA structure associated with a power regulator is proposed in their article. This structure, consisting of a high-pressure accumulator and a proportional valve, can flexibly store and utilize hydraulic energy according to changing control requirements. The concept of displaced volume was introduced to estimate the capacity of the power regulator. The actuator output position can be held fixed with a hydraulic lock. A specially developed compound control is available to ensure the correct operation of the actuator system. Simulation results show that the new actuator enables the system frequency bandwidth to be efficiently expanded with an optimal power supply [4].

Navatha et al., in their study, stated that the EHA system was initially used for aircraft flight control systems. Most of the existing research literature addresses EHA systems with a symmetric actuator configuration. The researchers attribute this to the fact that most aircraft applications use symmetric cylinders. However, they noted that asymmetric actuators are predominantly used in industrial applications. In their study, the authors developed a domestic experimental setup of an EHA system with a symmetric actuator, enhanced with sensors and instrumentation. Using a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller, the authors performed dynamic analysis, position tracking, and control of the EHA system by varying the speed of the drive motor. They tuned the PID using the Ziegler-Nichols (ZN) method.

Consequently, they examined the responses of Proportional-Integral (PI), Proportional-Derivative (PD), and PID controllers and found that the PD controller provided the best response [5].

Wu et al., in their article, described a multi-objective optimization preliminary design method for the electro-hydrostatic actuator with the goals of optimizing weight and efficiency. They developed models to estimate the weight and efficiency of the electro-hydrostatic actuator from the requirements of the control surface. Weight estimation models were obtained using scaling laws with collected data, and efficiency was calculated with a static energy loss model. A multi-objective optimization approach was used to find the Pareto front of the objectives and relevant design parameters. The proposed approach can investigate the effect of linkage length, pump displacement, and motor torque constant on the weight and efficiency of the electro-hydrostatic actuator, find Pareto front designs in the defined parameter space, and satisfy all relevant constraints. The authors used an electro-hydrostatic actuator for a control surface as a test case, demonstrating the proposed methodology by comparing three different conditions. Thus, the authors foresee that the proposed estimation models and multi-objective optimization preliminary design method can be applied to other components and systems as well [6].

Nostrani et al., in their work, present a digital hydraulic actuator called Digital Electro-Hydrostatic Actuator (DEHA) for aircraft flight control surfaces. They developed a mathematical model in their study and validated it on a test rig. The actuator was used to control an aircraft in the Aero-Data Model in a Research Environment (ADMIRE). Additionally, they developed a Servo-Hydraulic Actuator (SHA) model for comparison purposes. As a result of the study, they show that the DEHA could fly the ADMIRE aircraft in the proposed missions with an energy efficiency of 41.63%, while the SHA achieved an efficiency of 0.46% when LOE is considered. This represents a 90.5-fold increase in efficiency, revealing that DEHA could be a promising solution for aerospace applications.

MATERIAL VE METHOD

The electro-hydrostatic actuator is generally considered the preferred solution for electric aircraft propulsion systems. Optimizing weight, efficiency, and other key design parameters during the preliminary design phase is important [6].

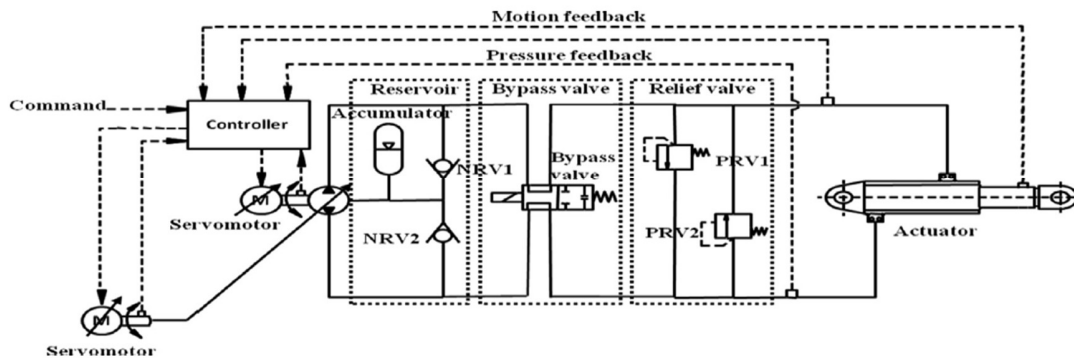


Figure 2. EHA diagram belonging to a Fixed Displacement Pump and Variable Servo Motor [7]

Various Components of the EHA

The electro-hydrostatic actuator is a self-contained system and is also known as power-by-wire supply. This actuation system is an integration of electrical and electro-hydraulic actuation. A typical EHA system

includes a motor that receives an input signal from the control unit and provides drive to the pump, an accumulator connected to the pump output to meet excess demand, and an actuator that fully extends and retracts the work [7].

BLDC Motor

The electric motor is one of the most important components of the EHA. The Brushless Direct Current (BLDC) motor has been extensively researched over the last decade due to the repetitive defects of brushed motors. These defects include arcing, short life, and low reliability. The BLDC motor has emerged as an excellent solution offering reduced weight, a compact and modular structure, easier maintenance, speed control, and improved reliability. In the EHA system, the BLDC motor is directly connected to the pump via a shaft; it receives an input signal from the controller, rotates accordingly, and provides drive to the pump. The rotor has two permanent magnets with opposite poles, and the stator has three pairs of coils arranged to have opposite poles. When DC supply is given to the coil, the coil is energized and becomes an electromagnet. The operation of the BLDC relies on the force interaction between the permanent magnet and the electromagnet and follows a precise sequence [7].

Hydraulic Pump

The hydraulic pump is the heart of the EHA, and its main function is to convert the mechanical energy of the motor into hydraulic pressure. Generally, an axial piston pump, also referred to as an EHA pump, is used. Hydrostatic drive systems are of two types: the first is the variable displacement piston pump, and the second is the fixed displacement external gear pump. Due to its simple structure, low maintenance requirement, and improved reliability, the gear pump is the most suitable option for high-temperature applications. High power transfer per unit volume is a critical requirement of any drive system. The power density of the pump can be changed by adjusting the rotational speed. While speed power density increases, speed power density decreases (sic). While speed power density decreases, the rotational speed of the EHA pump is more than 10,000 r/min, where the pump is estimated to provide less than 5 ml/r. However, achieving maximum speed from the pump may not always be possible because the pump's speed is limited by various mechanical factors. These factors include cavitation, heat problems, increased vibration, fatigue, wear, loss of preload, and larger radial clearance, etc. Two types of axial piston pumps are available: fixed displacement pump or variable displacement pump. The traditional bidirectional piston pump has a total of three ports: reversible inlet, outlet, and overflow/leakage flow. The speed of the electric motor is controlled by changing the speed of the electric motor. There will be a secondary high-performance motor driving the swashplate by changing the angle of this plate. Variable displacement is achieved in pumps. The advantage of using a variable displacement pump is that it increases efficiency and reduces the total size of the system. To reduce the possibility of back-driving and to reduce the angle of the swashplate to zero, instead of using a servo valve, the angle of the swashplate is changed using a servo motor with a segment gear arrangement. Due to the advantages mentioned above, the variable displacement bidirectional pump is ideal for flight control applications [7].

Hydraulic Actuator

The hydraulic actuator is the dynamic element that moves back and forth to provide the output of the EHA system. The hydraulic pressure received from the pump is converted into the force of the actuator. In the aircraft, the actuator is fixed in such a way that it controls the linkages by transferring the movement of the rod while operating, thus aiding in the control of the aircraft. It is used to transfer linear motion. Actuators are designed in two broad categories and are used worldwide: these are asymmetric actuators with a (single rod) arrangement and symmetric actuators with a (double rod) arrangement. The use and application of both actuator systems are different. The EHA with symmetric actuators having a double rod arrangement is widely used in the aviation industry for flight control purposes. Asymmetric actuators with a single rod arrangement

are the preferred and most suitable option for industrial applications. The symmetric actuator has many inherent advantages over the asymmetric actuator, so it is widely used in flight control actuation. The advantages associated with the system are [7].

- (a) The symmetric actuator has two cylinders, and the volume of hydraulic fluid displaced by the two chambers of the actuator is equal.
- (b) Equal maximum saturation speed and torque.
- (c) The controller structure is simplified due to identical dynamic characteristics [7].

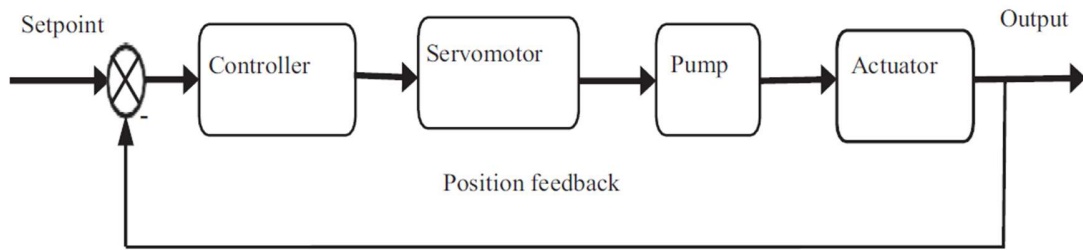


Figure 3. Block diagram of EHA position control logic [7]

The integrated architecture of these defined components constitutes the operational basis of EHA systems within the framework of the 'Power-by-Wire' concept. The working principle of the system is based on the electrical signal received from the control unit driving the motor, the fixed or variable displacement pump connected to the motor shaft converting this mechanical energy into hydraulic energy, and the pressurized fluid being transmitted directly to the cylinder to provide movement. This closed-loop hydraulic cycle localizes the system by eliminating the need for an external reservoir and central pipeline. In this study, a methodology of mathematical modeling and comparative analysis has been adopted to theoretically ground the advantages of the said system over other actuator types. Within the scope of the analysis, the performance of the EHA was evaluated with reference to traditional Servo-Hydraulic Actuators (SHA) and Electro-Mechanical Actuators (EMA). Power/weight ratio, energy efficiency, system complexity, leakage management, and dynamic response time were determined as comparison criteria. The theoretical analysis of the system is constructed upon fundamental physical equations (Newton's laws of motion and continuity equations) between motor torque, pump flow rate, and cylinder force; this approach aims to reveal the efficiency potential of the actuator under ideal conditions.

RESULT AND DISCUSSIONS

Theoretical investigations and system comparisons show that Electro-Hydrostatic Actuators (EHA) offer critical advantages, especially for the "More Electric Aircraft" (MEA) concept in the aviation industry. The results of the comparative analysis with Conventional Servo-Hydraulic (SHA) and Electro-Mechanical (EMA) systems are summarized in Table 1.

Table 1. Comparison of actuator systems used in the aerospace and defense industries.

Comparison Criteria	Conventional Hydraulic (SHA)	Electro-Mechanical (EMA)	Electro-Hydrostatic (EHA)
Power Transmission	Central hydraulic lines	Electric cables	Electric cables (Power-by-Wire)

Comparison Criteria	Conventional Hydraulic (SHA)	Electro-Mechanical (EMA)	Electro-Hydrostatic (EHA)
Energy Efficiency	Low (Requires continuous pressurization)	High (Draws power only during movement)	High (Draws power on demand)
Thermal Management	Cooled in central system (Easy)	Local heating problem exists	Local heating problem exists (Difficulty)
Jamming	Low risk	High risk (Mechanical jamming)	Low risk (Resolved with bypass valve)
Maintenance and Leakage	High maintenance, high leakage risk	Low maintenance, no leakage	Modular maintenance, minimized leakage
Weight	System heavy, components light	System light, actuator heavy	System light, actuator medium weight

Energy Efficiency and Power-on-Demand Principle

The findings reveal that the most distinct advantage of EHA systems lies in energy management. Traditional SHA systems require the central pump to continuously generate high pressure even if the flight surfaces are not moving, which leads to serious energy loss. In contrast, the EHA operates on the "Power-on-Demand" principle. That is, the electric motor draws energy only when the control surface is intended to be moved. This situation increases overall aircraft efficiency by minimizing parasitic energy losses, especially in long-duration flights.

Weight Saving and Structural Simplification

Another important finding regarding the EHA is its effect on the total weight of the aircraft. The removal of titanium or steel hydraulic pipe networks, valve blocks, and central reservoirs found in traditional systems provides significant weight savings. Although EHA units are individually heavier than SHA cylinders because they house an integrated motor and pump, it is observed that the total weight decreases and structural complexity is eliminated when viewed at the entire aircraft level (system basis). This directly contributes to reduced fuel consumption and increased payload capacity.

Ease of Maintenance and Reliability (Sustainability)

Another critical point to be discussed is the maintenance logistics of the system. In SHA systems, when a leak occurs, detecting the fault and cleaning the entire hydraulic line is time-consuming and costly. Furthermore, damage to a central line can cause the collapse of the entire hydraulic system. However, EHA systems are modular in structure. When one actuator fails, it does not affect other systems, and only the relevant unit can be removed and replaced with a new one. This feature significantly reduces the aircraft's time on the ground (AOG) and maintenance costs.

Current Constraints and the Thermal Management Problem

Despite the advantages of the EHA, the most important disadvantage that needs to be addressed in the discussion section is thermal management. While hydraulic fluid cools by returning to the central tank in SHA systems, the heat generated in the EHA is trapped on the actuator because it operates in a closed loop.

This situation can lead to overheating of the system during high-performance maneuvers. Therefore, EHA design should be addressed not only as a hydraulic but also as a thermal optimization problem.

In this study, Electro-Hydrostatic Actuator (EHA) technology, which plays a critical role in line with the aviation industry's More Electric Aircraft (MEA) vision, was examined comparatively with traditional Servo-Hydraulic (SHA) and Electro-Mechanical (EMA) systems. The analyses performed show that the Power-on-Demand principle offered by EHA systems significantly increases total energy efficiency by minimizing parasitic energy losses caused by continuous pressurization in central hydraulic systems. Additionally, the structural simplification and weight savings achieved by eliminating central pipelines, valve blocks, and reservoirs directly contribute to the aircraft's payload capacity. The modular structure of the system optimizes flight safety and maintenance processes by preventing a fault from spreading to other systems in case of a possible failure. However, it has been determined that the most prominent constraint in front of the widespread use of EHA technology is the thermal management difficulties arising from its closed-loop hydraulic structure. In light of current findings, it is recommended that future studies focus on the development of active cooling systems integrated into the actuator body and high-heat-resistant hydraulic fluids. Consequently, it is foreseen that with the overcoming of thermal bottlenecks, EHA technology, offering high power density and reliability, will become the primary actuator standard in future aviation and space systems.

REFERENCES

- [1] N. Alle, S. S. Hiremath, S. Makaram, K. Subramaniam, and A. Talukdar, "Review on electro hydrostatic actuator for flight control," *International Journal of Fluid Power*, vol. 17, no. 2, pp. 125-145, 2016.
- [2] "Aircraft EHA Actuators." <https://www.moog.com/products/actuators-servoactuators/actuation-technologies/electrohydrostatic/aircraft-eha.html> (accessed 13.12.2025, 2025).
- [3] Q. Chao, J. Zhang, B. Xu, H. Huang, and M. Pan, "A review of high-speed electro-hydrostatic actuator pumps in aerospace applications: challenges and solutions," *Journal of Mechanical Design*, vol. 141, no. 5, p. 050801, 2019.
- [4] K. Rongjie, J. Zongxia, W. Shaoping, and C. Lisha, "Design and simulation of electro-hydrostatic actuator with a built-in power regulator," *Chinese journal of aeronautics*, vol. 22, no. 6, pp. 700-706, 2009.
- [5] A. Navatha, K. Bellad, S. S. Hiremath, and S. Karunanidhi, "Dynamic analysis of electro hydrostatic actuation system," *Procedia Technology*, vol. 25, pp. 1289-1296, 2016.
- [6] S. Wu, B. Yu, Z. Jiao, Y. Shang, and P. Luk, "Preliminary design and multi-objective optimization of electro-hydrostatic actuator," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 231, no. 7, pp. 1258-1268, 2017.
- [7] M. Kumar, "A survey on electro hydrostatic actuator: Architecture and way ahead," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 6057-6063, 2021.

OTONOM SÜRÜ TEKNOLOJİLERİ VE MODERN HARPTTE DÖNÜŞÜM

Rümeysa BAY^{1*}

¹Department of Electric Electronic Engineering, Selçuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya, ORCID: 0000-0001-5928-8457

(rumeysaby.7330@gmail.com)

Özet – Otonom sürü teknolojilerinin modern harp doktrinlerinde yarattığı dönüşümü teknik temelleriyle incelemeyi amaçlamaktadır. Son yıllarda gelişen işlemci kapasitesi, sensör teknolojileri, haberleşme protokolleri ve yapay zekâ tabanlı kontrol algoritmaları sayesinde, çoklu ajanlardan oluşan sürü sistemleri askeri alanda stratejik önem kazanmıştır. Bu çalışma, sürü mimarisinin temel bileşenlerini; statik ve dinamik sürü yapılanmaları, dağıtık kontrol algoritmaları, görev planlama yöntemleri, haberleşme topolojileri ve çok katmanlı güvenlik tasarımlarını mühendislik perspektifiyle ele almaktadır. Ayrıca sürü içi koordinasyon, veri paylaşımı, sensör füzyonu, hedef tespiti, enerji optimizasyonu ve görev süresince hata toleransı gibi operasyonel parametreler ayrıntılı biçimde analiz edilmektedir. Makale, hem teorik altyapıyı hem de sahada uygulanabilir adımları bir araya getirerek; simülasyon-odaklı doğrulama yöntemlerinden gerçek saha senaryolarına uzanan bütüncül bir geliştirme süreci sunmaktadır. Bu bağlamda, haberleşme kesintileri, GNSS spoofing ve jamming gibi elektronik harp tehditlerine karşı alınması gereken teknik önlemler adım adım değerlendirilmektedir. Çalışma ayrıca, sürü sistemlerinin etik, hukuksal ve operasyonel sorumluluk çerçevesindeki sınırlarına da dikkat çekmekte; insan-denetimli otonomi gerekliliğini vurgulamaktadır. Sonuç olarak bu makale, otonom sürü sistemlerinin tasarımı, uygulanmasını ve sahada test edilmesini hedefleyen mühendisler ve araştırmacılar için kapsamlı bir başvuru niteliği taşımaktadır. Sunulan yöntem ve teknik rehberlik, modern savunma uygulamalarında sürü teknolojilerinin etkin, güvenilir ve ölçeklenebilir biçimde kullanılmasını desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler –Eşdeğer Elektrik Devresi; Sürü İHA Modellemesi; Sürü Kontrol Mimarisi; Çok Bantlı Haberleşme; Kolektif Zeka

GİRİŞ

Otonom sürü teknolojileri, çok sayıda otonom ya da yarı-otonom aracın merkezi bir kontrol mekanizmasına sürekli bağlı olmaksızın, ortak bir hedef doğrultusunda koordineli ve iş birliği içerisinde hareket edebilmesini sağlayan sistemler olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemlerin temelinde, bireysel olarak sınırlı yeteneklere sahip ajanların, basit yerel kurallar ve karşılıklı etkileşimler sayesinde karmaşık ve etkili kolektif davranışlar sergileyebilmesi yatmaktadır. Bu yaklaşım, doğadaki karınca kolonileri, arı sürüleri, kuş formasyonları ve balık okulları gibi biyolojik sistemlerin davranış modellerinden esinlenmiştir.

Geleneksel askeri sistemler çoğunlukla merkezi kontrol, yüksek maliyetli platformlar ve insan operatörüne bağımlı karar verme süreçleri üzerine kuruludur. Ancak modern harp ortamı; elektronik harp tehditleri, siber saldırılar, yoğun veri akışı, çok alanlı (kara-hava-deniz-uzay-siber) operasyonlar ve hızlı değişen taktik ihtiyaçlar nedeniyle bu yapıları giderek daha kırılgan hâle getirmektedir. Merkezi kontrolün devre dışı kalması durumunda tüm sistemin işlevsiz hâle gelmesi, klasik askeri platformların en önemli zayıflıklarından biridir.

Otonom sürü sistemleri ise bu kırılganlığı ortadan kaldırmayı hedefleyen dağıtık bir mimari sunmaktadır. Sürü içerisindeki her bir ajan, çevresini algılayabilen sensörlere, yerel karar verme yeteneğine ve diğer ajanlarla sınırlı veri paylaşımı yapabilen haberleşme altyapısına sahiptir. Bu yapı sayesinde sürü; görev esnasında ajan kayıplarına rağmen operasyonuna devam edebilmekte, çevresel değişimlere uyum sağlayabilmekte ve görev önceliklerini dinamik olarak yeniden belirleyebilmektedir. Bu özellikler, sürü sistemlerini hata toleransı yüksek ve ölçeklenebilir çözümler hâline getirmektedir.

Son yıllarda mikroişlemci ve gömülü sistem teknolojilerindeki gelişmeler, düşük güç tüketimiyle yüksek hesaplama kapasitesine sahip platformların yaygınlaşmasını sağlamıştır. Buna paralel olarak yapay zekâ, makine öğrenmesi ve özellikle pekiştirmeli öğrenme tabanlı algoritmalar, sürü içi koordinasyon ve karar alma süreçlerinde etkin biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Sensör füzyonu teknikleri sayesinde farklı ajanlardan elde edilen veriler birleştirilerek daha doğru çevresel farkındalık oluşturulabilmekte, hedef tespiti ve görev planlama süreçleri optimize edilebilmektedir.

Otonom sürü teknolojilerinin askeri alandaki kullanım alanları oldukça geniştir. Keşif ve gözetleme faaliyetlerinden elektronik harp uygulamalarına, lojistik destekten doygunluk taarruzlarına kadar pek çok görev senaryosunda sürü sistemleri etkin çözümler sunmaktadır. Özellikle doygunluk saldırıları kapsamında, çok sayıda düşük maliyetli insansız aracın eş zamanlı olarak kullanılması, gelişmiş hava savunma sistemlerinin kapasitesini zorlayarak stratejik üstünlük sağlamaktadır. Bu durum, modern harp doktrinlerinde nicelik ve koordinasyonun, tekil platform gücünden daha önemli hâle gelmesine neden olmuştur.

Bununla birlikte, otonom sürü sistemlerinin artan kullanım alanı etik, hukuki ve operasyonel sorumlulukları da beraberinde getirmektedir. Tam otonom silah sistemlerinin karar alma süreçlerinde insan faktörünün dışlanması, uluslararası hukuk ve etik ilkeler açısından önemli tartışmalara yol açmaktadır. Bu nedenle güncel yaklaşımlar, insan-denetimli otonomi kavramını ön plana çıkarmakta ve kritik karar mekanizmalarında insan müdahalesinin korunmasını hedeflemektedir.

Bu çalışma, otonom sürü teknolojilerinin teknik temellerini, kontrol ve haberleşme mimarilerini ve modern harp üzerindeki dönüştürücü etkilerini mühendislik perspektifiyle ayrıntılı biçimde ele almayı amaçlamaktadır. Sunulan analiz, teorik altyapı ile uygulamaya yönelik değerlendirmeleri bir araya getirerek, savunma alanında çalışan mühendisler ve araştırmacılar için kapsamlı bir referans oluşturmayı hedeflemektedir.

MATERIALS AND METHOD

Sistem Mimarisi ve Çok Katmanlı Yapı

Bu çalışmada ele alınan otonom sürü sistemi, çoklu ajan (multi-agent) mimarisi temel alınarak tasarlanmıştır. Her bir ajan; fiziksel olarak bağımsız, hesaplama ve karar verme yeteneğine sahip, ancak sürü davranışı kapsamında diğer ajanlarla koordinasyon sağlayabilen otonom bir platformdur. Sistem mimarisinin temel amacı; görev sürekliliğini sağlamak, hata toleransını artırmak ve değişen çevresel koşullara hızlı uyum gösterebilen ölçeklenebilir bir yapı oluşturmaktır.

Sistem, işlevsel bütünlüğü sağlamak amacıyla çok katmanlı (layered) bir mimari yaklaşımı ile modellenmiştir. Bu yaklaşım, karmaşık sürü davranışlarının daha yönetilebilir alt bileşenlere ayrılmasına olanak tanımakta ve her katmanın bağımsız olarak geliştirilip test edilebilmesini sağlamaktadır. Önerilen mimari üç ana katman altında incelenmiştir.

Algılama (Perception) Katmanı: Bu katman, ajanların çevre ile etkileşimini sağlayan temel bileşenleri içermektedir. Kamera, lidar, radar, IMU, GNSS ve çevresel sensörler aracılığıyla elde edilen ham veriler bu katmanda toplanmaktadır. Algılama katmanının temel görevi, çevresel durumun mümkün olduğunca doğru ve güncel bir temsiliyi oluşturmaktır. Sensörlerden gelen veriler, gürültü ve belirsizlikler göz önünde bulundurularak ön işleme ve filtreleme süreçlerinden geçirilmektedir. Bu katman, sürü sisteminin çevresel farkındalığının temelini oluşturmaktadır.

Karar ve Kontrol Katmanı: Algılama katmanından elde edilen işlenmiş veriler, karar ve kontrol katmanında değerlendirilmekte ve sürü davranışını belirleyen kontrol sinyallerine dönüştürülmektedir. Bu katmanda yerel karar verme mekanizmaları, görev planlama algoritmaları ve sürü kontrol stratejileri birlikte çalışmaktadır. Dağıtık kontrol mimarisi kapsamında her ajan, kendi yerel kararlarını alabilmekte; ancak sürü bütünlüğünü korumak amacıyla komşu ajanlarla sınırlı veri paylaşımı yapmaktadır. Çarpışma önleme, formasyon kontrolü, görev paylaşımı ve hedef önceliklendirme gibi kritik işlevler bu katmanda gerçekleştirilmektedir.

Bu katman, sistemin otonomi seviyesini doğrudan belirlemekte olup yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı algoritmaların entegrasyonuna açıktır. Özellikle dinamik ve hibrit sürü yapılarında, çevresel değişimlere adaptasyon bu katman üzerinden sağlanmaktadır.

İcra (Actuation) Katmanı: İcra katmanı, karar ve kontrol katmanında üretilen komutların fiziksel hareketlere dönüştürüldüğü katmandır. Motor sürücüler, yönlendirme mekanizmaları ve görev icra birimleri bu katmanda yer almaktadır. İcra katmanının tasarımı, hızlı tepki süresi ve kararlı hareket kontrolü sağlayacak şekilde yapılmıştır. Ayrıca bu katman, donanımsal arızalara karşı yerel güvenlik mekanizmaları içermekte ve acil durum senaryolarında ajanın güvenli moda geçmesini mümkün kılmaktadır.

Katmanlar arası veri akışı, gecikme, bant genişliği ve hata toleransı kriterleri dikkate alınarak yapılandırılmıştır. Bu sayede sistem, ajan kayıpları veya haberleşme kesintileri gibi durumlarda kısmi işlevsellik kaybı yaşasa dahi genel görevini sürdürebilmektedir. Çok katmanlı mimari yaklaşımı, otonom sürü sisteminin modülerliğini artırmakta ve farklı görev senaryolarına uyarlabilirliğini önemli ölçüde güçlendirmektedir.

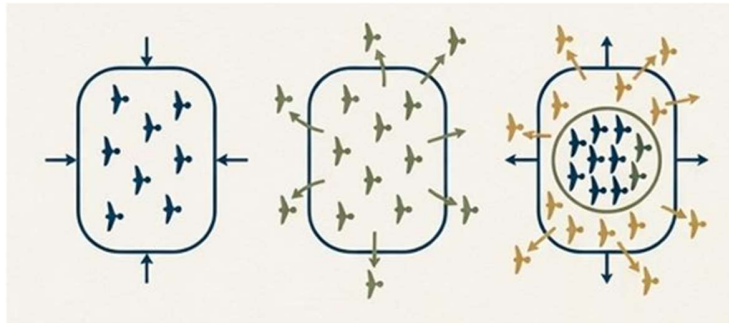
Sürü Yapılandırılmaları: Statik, Dinamik ve Hibrit Mimarileri

Otonom sürü sistemlerinde kullanılan yapılanmalar, görev türüne ve operasyonel ortama bağlı olarak statik, dinamik ve hibrit olmak üzere üç ana grupta değerlendirilmektedir.

Statik sürü yapıları, sürüde yer alan ajan sayısının ve görev rollerinin görev öncesinde tanımlandığı yapılardır. Bu mimaride sürü formasyonu ve görev paylaşımı sabittir. Statik yapılar, haberleşme gereksiniminin düşük olması ve kontrolün öngörülebilirliği nedeniyle basit görev senaryolarında tercih edilmektedir. Ancak ajan kayıpları ve çevresel değişimlere karşı esneklikleri sınırlıdır.

Dinamik sürü yapıları, görev esnasında ajan sayısının, rollerin ve görev önceliklerinin değişebildiği yapılardır. Bu mimaride sürü, çevresel koşullara ve görev gereksinimlerine göre kendini yeniden yapılandırabilmektedir. Dinamik yapılar, özellikle keşif, gözetleme ve harp ortamında yüksek adaptasyon gerektiren senaryolarda avantaj sağlamaktadır. Ancak bu yaklaşım, daha karmaşık kontrol algoritmaları ve güçlü haberleşme altyapısı gerektirmektedir.

Hibrit sürü yapıları ise statik ve dinamik yaklaşımların avantajlarını bir araya getirmektedir. Temel görev yapısı önceden belirlenmiş olmakla birlikte, görev sırasında belirli parametreler dinamik olarak güncellenebilmektedir. Hibrit mimariler, modern askeri uygulamalarda en yaygın tercih edilen yapı olarak öne çıkmaktadır.

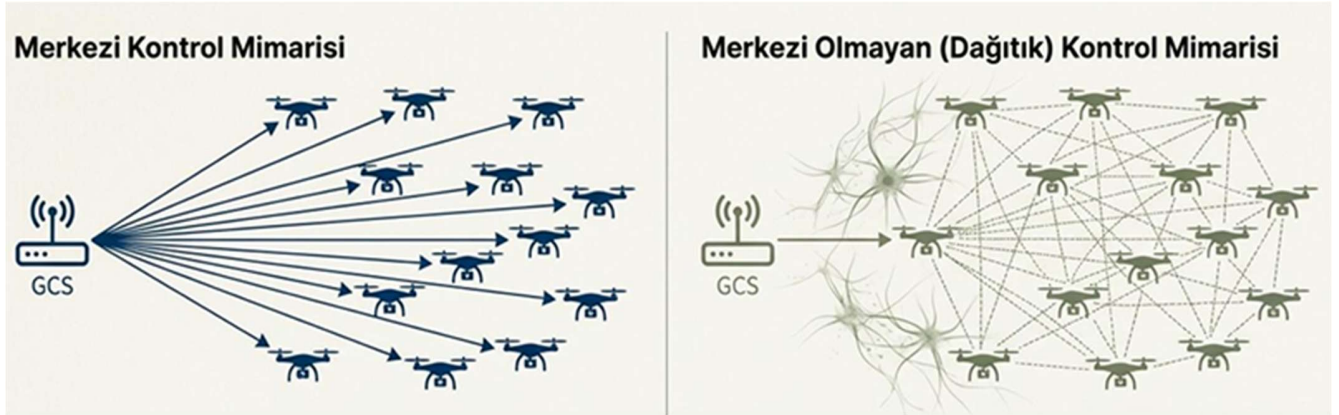


Şekil 1. Statik, Dinamik, Hibrit Sürü İHA yapısı

Kontrol Yapısı ve Dağıtık Sürü Algoritmaları

Otonom sürü sistemlerinde kontrol yapısı, sistemin otonomi seviyesi, hata toleransı ve görev başarımı üzerinde doğrudan belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada, modern harp ortamlarının gereksinimleri göz önünde bulundurularak merkezi olmayan, dağıtık kontrol mimarisi tercih edilmiştir. Dağıtık kontrol yaklaşımı, sürü

içerisindeki her bir ajanın kendi algılamalarına ve yerel bilgiye dayanarak karar alabilmesini sağlarken, sürü bütünlüğünün korunması için sınırlı ve hedefe yönelik ajanlar arası etkileşimi esas almaktadır.



Şekil 2. Kontrol Mimarisi Yapısı

Dağıtık kontrol mimarisinin temel avantajı, tek bir kontrol düğümüne bağımlılığı ortadan kaldırarak sistemi tek hata noktasından arındırmasıdır. Bu yapı sayesinde ajan kayıpları, haberleşme kesintileri veya çevresel belirsizlikler, tüm sürünün işlevsiz hâle gelmesine neden olmamaktadır. Her bir ajan, görev süresince otonom olarak çalışabilmekte ve sürü davranışı, yerel kararların kolektif etkileşimi sonucu ortaya çıkmaktadır.

Kontrol yapısı üç ana düzeyde ele alınmıştır:

Yerel Kontrol Düzeyi: Bu düzeyde her ajan, kendi sensörlerinden elde ettiği veriler doğrultusunda anlık kararlar almaktadır. Çarpışma önleme, engel algılama ve temel hareket kontrolü gibi düşük seviye görevler bu düzeyde gerçekleştirilmektedir. Yerel kontrol mekanizmaları, yüksek tepki hızı gerektiren durumlar için kritik öneme sahiptir ve genellikle geri beslemeli kontrol döngüleri ile modellenmektedir.

Sürü İçi Koordinasyon Düzeyi: Bu düzey, ajanlar arası etkileşimin gerçekleştiği ve sürü davranışının şekillendiği katmanı temsil etmektedir. Ajanlar, yalnızca komşu düğümlerden aldıkları sınırlı bilgi doğrultusunda hız, yön ve konum bilgilerini uyumlu hâle getirmektedir. Bu yaklaşım, haberleşme yükünü azaltırken sürü bütünlüğünün korunmasını sağlamaktadır.

Bu düzeyde kullanılan algoritmaların temelini, literatürde yaygın olarak kullanılan Boids tabanlı sürü prensipleri oluşturmaktadır. Bu prensipler; çarpışma önleme (separation), hizalanma (alignment) ve yakınlık (cohesion) kurallarına dayanmaktadır. Basit yerel kuralların uygulanmasıyla, karmaşık ve ölçeklenebilir sürü davranışları elde edilebilmektedir.

Görev ve Karar Düzeyi: Bu düzeyde sürünün genel görev hedefleri, önceliklendirme mekanizmaları ve görev paylaşımı süreçleri ele alınmaktadır. Dağıtık görev planlama yaklaşımları sayesinde ajanlar, görevleri aralarında paylaştırabilmekte ve çevresel değişimlere bağlı olarak bu görevleri dinamik biçimde yeniden düzenleyebilmektedir. Konsensüs algoritmaları, sürü genelinde ortak karar alınmasını sağlamak amacıyla bu düzeyde kullanılmaktadır.

Dağıtık kontrol yapısını desteklemek amacıyla, yapay zekâ tabanlı yöntemler de değerlendirilmiştir. Özellikle pekiştirmeli öğrenme yaklaşımları, sürünün daha önce karşılaşmamış senaryolarda dahi öğrenerek optimal davranış geliştirebilmesine olanak tanımaktadır. Bu yöntemlerde her ajan, çevreden aldığı geri bildirimlere göre politika güncellemesi yapmakta ve uzun vadede görev başarımını artırmayı hedeflemektedir.

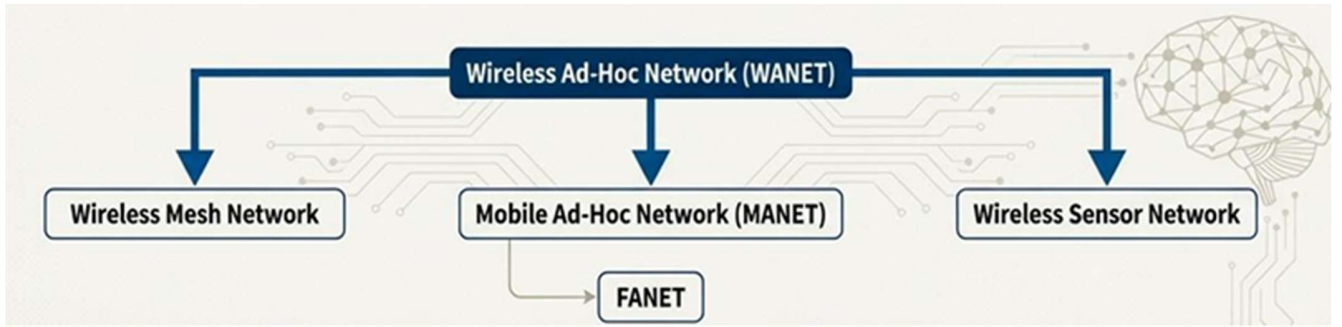
Kontrol algoritmalarının tasarımında, kararlılık, ölçeklenebilirlik ve hesaplama yükü gibi mühendislik kriterleri dikkate alınmıştır. Ajan sayısının artması durumunda dahi sistem performansının kabul edilebilir seviyelerde kalması, dağıtık kontrol yaklaşımının en önemli kazanımlarından biridir.

Bu alt başlık altında; dağıtık kontrol mimarisini gösteren blok diyagramlar, Boids prensiplerini temsil eden şematik görseller, kontrol akış diyagramları ve görev paylaşım mekanizmalarını açıklayan şekillerin kullanılması önerilmektedir.

Haberleşme Altyapısı ve Ağ Topolojileri

Otonom sürü sistemlerinde haberleşme altyapısı, sürü içi koordinasyonun sürekliliğini sağlayan en kritik bileşenlerden biridir. Kontrol algoritmalarının etkin biçimde çalışabilmesi, ajanlar arasında güvenilir, düşük gecikmeli ve kesintilere karşı dayanıklı bir iletişim yapısının varlığına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle sürü sistemlerinde kullanılan haberleşme mimarileri, klasik nokta-nokta veya merkezi ağ yapılarından farklı olarak, dağıtık, esnek ve yeniden yapılandırılabilir ağ topolojileri üzerine inşa edilmektedir.

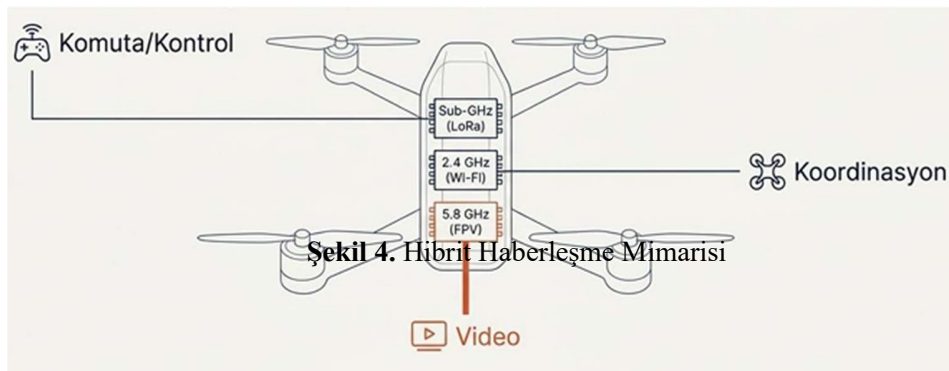
Bu çalışmada, modern harp ortamlarının gereksinimleri doğrultusunda ad-hoc tabanlı mesh ağ topolojisi esas alınmıştır. Mesh ağ yapısında her bir ajan, hem veri üreten bir uç düğüm hem de ağın devamlılığını sağlayan bir yönlendirici görevi üstlenmektedir. Bu yapı, ağ içerisindeki herhangi bir düğümün devre dışı kalması durumunda, verinin alternatif yollar üzerinden iletilmesine olanak tanıyarak haberleşme sürekliliğini artırmaktadır.



Şekil 3. Sürü İHA Haberleşme Çesitleri

Haberleşme altyapısı, katmanlı bir yaklaşım çerçevesinde aşağıdaki bileşenler üzerinden değerlendirilmiştir:

Fiziksel Katman: Fiziksel katmanda, görev senaryosuna bağlı olarak farklı frekans bantlarında çalışan RF haberleşme modülleri kullanılmaktadır. Sub-GHz bantları, uzun menzil ve düşük güç tüketimi avantajı sağlarken; 2.4 GHz ve benzeri yüksek frekans bantları, yüksek veri hızı gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir. Çok bantlı yapı sayesinde sürü sistemi, farklı görev ihtiyaçlarına dinamik olarak uyum sağlayabilmektedir.



Şekil 4. Hibrit Haberleşme Mimarisi

Şekil 4. Sürü İHA Kontrol

Veri Bağlantı Katmanı: Bu katmanda veri paketleme, hata algılama, yeniden iletim ve adresleme mekanizmaları ele alınmaktadır. Ajanlar arası iletişimde veri bütünlüğünün korunması ve paket kayıplarının minimize edilmesi, sürü davranışının kararlılığı açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle yoğun ağ trafiği altında, verimli paket yönetimi sürü performansını doğrudan etkilemektedir.

Ağ Katmanı ve Yönlendirme Mekanizmaları: Mesh ağ topolojisinde yönlendirme, dinamik ve çok atlamalı (multi-hop) veri iletimini destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Ajanlar, ağ durumuna bağlı olarak en uygun veri iletim yolunu seçebilmekte ve ağ topolojisi görev esnasında kendini yeniden yapılandırabilmektedir. Bu yaklaşım, sürü sisteminin hareketli ve değişken ortamlarda dahi haberleşme bütünlüğünü korumasını sağlamaktadır.

Haberleşme altyapısında, çok bantlı ve görev öncelikli veri iletimi yaklaşımı benimsenmiştir. Kritik kontrol ve koordinasyon verileri, düşük gecikmeli ve daha güvenilir kanallar üzerinden iletilirken; yüksek hacimli sensör verileri daha yüksek bant genişliği sunan kanallara yönlendirilmektedir. Bu ayırım, ağ üzerindeki yükü



dengeleyerek sistem performansını artırmaktadır.

Şekil 5. Yük altında dayanıklılık testi

Modern harp ortamlarında sürü sistemleri, elektronik harp tehditleri nedeniyle haberleşme kesintilerine maruz kalabilmektedir. Bu bağlamda ağ topolojisi ve haberleşme protokolleri, jamming ve spoofing gibi tehditlere karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Alternatif veri yolları, yedekli düğüm yapısı ve dinamik yönlendirme mekanizmaları, haberleşme altyapısının direnç seviyesini artırmaktadır.

Sonuç olarak önerilen haberleşme altyapısı ve ağ topolojisi, sürü sistemlerinin yüksek hareketlilik, ajan kaybı ve elektronik harp koşulları altında dahi koordinasyonunu sürdürebilmesini hedeflemektedir. Bu yapı, dağıtık kontrol algoritmaları ile bütünleşik biçimde çalışarak otonom sürü sistemlerinin operasyonel etkinliğini artırmaktadır.

Elektronik Harp Koşullarında Güvenlik ve Dayanıklılık

Otonom sürü sistemlerinin modern harp ortamlarında etkin biçimde görev yapabilmesi, yalnızca kontrol ve haberleşme yeteneklerine değil; aynı zamanda elektronik harp (EH) tehditlerine karşı dayanıklılık seviyesine de doğrudan bağlıdır. Günümüz muharebe sahasında jamming, spoofing, siber saldırılar ve elektromanyetik karıştırma faaliyetleri, insansız ve otonom sistemlerin en kritik zafiyet alanlarını oluşturmaktadır. Bu nedenle sürü sistemlerinin tasarımında güvenlik ve dayanıklılık, temel bir sistem gereksinimi olarak ele alınmaktadır.



Şekil 6. Sürü İHA yapısal görseli

Bu çalışmada, elektronik harp koşullarında sürü sistemlerinin görev sürekliliğini koruyabilmesi amacıyla çok katmanlı bir güvenlik yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşım, haberleşme altyapısı, kontrol mimarisi ve konumlama sistemlerini kapsayacak şekilde bütüncül olarak ele alınmaktadır.

Haberleşme Güvenliği ve Karıştırmaya Dayanıklılık: Sürü içi haberleşmenin elektronik harp tehditlerine karşı korunabilmesi için frekans atlamalı yayılım (Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS) ve düşük olasılıklı tespit (Low Probability of Intercept – LPI) prensiplerine dayalı yöntemler değerlendirilmiştir. Frekans atlamalı yapı, karıştırma girişimlerinin etkisini sınırlandırarak haberleşmenin belirli bir frekans bandına bağımlı kalmasını engellemektedir. Ayrıca paket bazlı veri iletimi ve yeniden yönlendirme mekanizmaları sayesinde, kısmi haberleşme kayıpları sürü davranışını tamamen durdurmamaktadır.

Kriptolu Veri İletimi ve Kimlik Doğrulama: Sürü sistemlerinde ajanlar arası veri iletiminin gizliliği ve bütünlüğü kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda simetrik ve asimetrik kriptografik yöntemler kullanılarak veri paketlerinin yetkisiz erişime karşı korunması hedeflenmektedir. Ajan kimlik doğrulama mekanizmaları, sahte düğümlerin (spoofed nodes) sürü ağına dâhil olmasını engellemekte ve sürü bütünlüğünü korumaktadır.

GNSS Spoofing ve Navigasyon Dayanıklılığı: GNSS tabanlı konumlama sistemleri, elektronik harp ortamlarında spoofing ve karıştırma saldırılarına karşı savunusuzdur. Bu nedenle sürü sistemlerinde GNSS bağımlılığını azaltan alternatif konumlama yaklaşımları değerlendirilmiştir. Ataletsel ölçüm birimleri (IMU), göreceli konumlama ve ajanlar arası mesafe bilgisine dayalı lokal navigasyon yöntemleri, GNSS verisinin güvenilmez hâle geldiği durumlarda sürünün görevine devam edebilmesini sağlamaktadır.

Dağıtık Yapı ve Görev Sürekliliği: Dağıtık kontrol ve mesh ağ topolojisi, elektronik harp koşullarında sistem dayanıklılığını artıran temel unsurlardır. Merkezi kontrol düğümünün bulunmaması, hedef alınabilecek kritik noktaların sayısını azaltmakta ve sürü sisteminin tamamının devre dışı bırakılmasını zorlaştırmaktadır. Ajan kayıpları veya izolasyon durumlarında, sürü kalan bileşenleriyle görevine devam edebilmektedir.

Adaptif ve Yeniden Yapılanabilir Güvenlik Mekanizmaları: Elektronik harp tehditleri dinamik bir yapıya sahip olduğundan, sürü sistemlerinin statik güvenlik önlemleriyle sınırlı kalmaması gerekmektedir. Bu kapsamda adaptif haberleşme parametreleri, görev önceliğine bağlı veri iletimi ve çevresel tehdit algısına göre yapılandırılabilen güvenlik seviyeleri değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, sürü sisteminin değişen tehdit koşullarına karşı esnekliğini artırmaktadır.

Sonuç olarak, elektronik harp koşullarında güvenlik ve dayanıklılık; sürü sistemlerinin yalnızca hayatta kalmasını değil, aynı zamanda görev başarımını sürdürebilmesini mümkün kılan temel faktörlerdir. Önerilen

çok katmanlı güvenlik yaklaşımı, dağıtık kontrol ve haberleşme mimarileriyle bütünleşik biçimde çalışarak otonom sürü sistemlerinin operasyonel güvenilirliğini artırmaktadır.

Veri Paylaşımı, Sensör Füzyonu ve Görev Planlama

Otonom sürü sistemlerinde görev başarımını doğrudan etkileyen temel unsurlardan biri, ajanlar arasında gerçekleştirilen veri paylaşımı ve bu verilerin anlamlı bilgiye dönüştürülme sürecidir. Sürü yapısında her bir ajan, sahip olduğu sensörler aracılığıyla çevreye ilişkin kısmi ve yerel bilgiler elde etmektedir. Bu bilgilerin uygun biçimde paylaşılması ve birleştirilmesi, sürü genelinde yüksek doğrulukta durumsal farkındalık (situational awareness) oluşturulmasını mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmada veri paylaşımı yaklaşımı, yerel işleme ve seçici veri iletimi prensiplerine dayandırılmıştır. Her ajan, sensörlerinden elde ettiği ham verileri öncelikle kendi üzerinde işlemekte ve yalnızca görev açısından kritik olan özet bilgileri sürü ile paylaşmaktadır. Bu yaklaşım, haberleşme bant genişliği kullanımını azaltmakta ve ağ üzerindeki yükü dengeleyerek sistem performansını artırmaktadır.

Veri Paylaşım Mekanizmaları: Ajanlar arası veri paylaşımı, görev türüne ve öncelik seviyesine bağlı olarak yapılandırılmaktadır. Konum, hız, yönelim ve tehdit bilgileri gibi kritik kontrol verileri düşük gecikmeli kanallar üzerinden öncelikli olarak iletilirken; yüksek hacimli sensör verileri, gerektiğinde ve uygun ağ koşulları altında paylaşılmaktadır. Bu önceliklendirme, sürü içi koordinasyonun sürekliliğini sağlamaktadır.

Sensör Füzyonu Yaklaşımı: Sensör füzyonu, farklı ajanlardan ve farklı sensör türlerinden elde edilen verilerin birleştirilerek daha güvenilir ve bütüncül bir çevre algısı oluşturulmasını amaçlamaktadır. Bu çalışmada sensör füzyonu, dağıtık bir yapı içerisinde ele alınmıştır. Her ajan, kendi yerel sensör verilerini işlerken; komşu ajanlardan gelen bilgilerle bu verileri desteklemekte ve doğrulamaktadır. Bu yaklaşım, tek bir sensör veya ajandan kaynaklanan hataların sürü geneline yayılmasını engellemektedir.

Füzyon sürecinde, zaman senkronizasyonu ve veri tutarlılığı önemli parametreler olarak ele alınmıştır. Ajanlar arası veri paylaşımında zaman damgaları kullanılarak gecikmelerin etkisi minimize edilmektedir. Böylece sürü genelinde ortak ve tutarlı bir durum değerlendirmesi sağlanmaktadır.

Görev Planlama ve Dağıtık Görev Paylaşımı: Görev planlama süreci, sürünün genel hedeflerinin belirlenmesi ve bu hedeflerin ajanlar arasında etkin biçimde paylaşılmasını kapsamaktadır. Dağıtık görev planlama yaklaşımı sayesinde her ajan, mevcut durumu, enerji seviyesi ve çevresel koşulları dikkate alarak görev üstlenebilmektedir. Görevler, ajanların yetenekleri ve konumlarına bağlı olarak dinamik biçimde yeniden dağıtılabilmektedir.

Bu yapı, özellikle dinamik ve belirsiz harp ortamlarında sürü sistemlerinin esnekliğini artırmaktadır. Ajan kayıpları veya görev önceliklerinin değişmesi durumunda, sürü görev planını yeniden yapılandırarak operasyonel sürekliliği koruyabilmektedir.

Durumsal Farkındalık ve Karar Destek Süreçleri: Veri paylaşımı ve sensör füzyonu sonucunda elde edilen bütüncül bilgi, sürü içi karar destek mekanizmalarında kullanılmaktadır. Bu bilgi, hedef tespiti, tehdit değerlendirmesi ve görev önceliklendirme süreçlerinde sürü genelinde ortak bir bakış açısı oluşturulmasını sağlamaktadır. Böylece bireysel ajan kararları, sürü hedefleriyle uyumlu hâle getirilmektedir.

Sonuç olarak veri paylaşımı, sensör füzyonu ve görev planlama süreçleri; otonom sürü sistemlerinin koordinasyon, adaptasyon ve görev başarımı açısından temel yapı taşlarını oluşturmaktadır. Bu süreçlerin dağıtık ve önceliklendirilmiş bir mimari çerçevesinde ele alınması, sürü sistemlerinin karmaşık ve tehdit içeren ortamlarda etkin biçimde çalışabilmesini sağlamaktadır.

SANUC VE TARTIŞMA

Yapılan kapsamlı literatür incelemeleri ve simülasyon temelli çalışmaların değerlendirilmesi sonucunda, otonom sürü sistemlerinin modern harp ortamlarında operasyonel etkinliği artırma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Özellikle çoklu ajan yapısının sağladığı esneklik ve dağıtık karar alma yeteneği, karmaşık ve belirsiz görev senaryolarında sistem performansını olumlu yönde etkilemektedir. Literatürde raporlanan

bulgular, sürü yapılarının tekil platformlara kıyasla daha geniş alan kapsamı sağladığını ve görev başarımını artırabildiğini göstermektedir.

Mevcut çalışmalar incelendiğinde, dağıtık kontrol mimarilerinin merkezi kontrol yaklaşımlarına kıyasla daha yüksek hata toleransı sunduğu dikkat çekmektedir. Merkezi sistemlerde tek bir kontrol biriminin devre dışı kalması tüm görevin başarısızlıkla sonuçlanmasına neden olabilmekteyken, dağıtık mimarilerde bu risk önemli ölçüde azalmaktadır. Simülasyon tabanlı araştırmalar, sürü içerisindeki bazı ajanların kaybı veya iletişim dışı kalması durumunda dahi sistemin görevine sınırlı performans kaybı ile devam edebildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, sürü sistemlerinin görev sürekliliği açısından önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir.

Literatürde yer alan dinamik görev senaryolarına yönelik çalışmalar, sürü yapılarının çevresel değişimlere ve görev önceliklerine hızlı biçimde uyum sağlayabildiğini vurgulamaktadır. Görevlerin önceden sabit olarak tanımlandığı statik yapılar yerine, anlık duruma göre yeniden planlama yapabilen dağıtık ve hibrit yaklaşımların daha başarılı sonuçlar verdiği bildirilmektedir. Bu bağlamda, sürü sistemlerinin adaptasyon yeteneği modern harp ortamlarının gereksinimleriyle yüksek düzeyde örtüşmektedir.

Haberleşme altyapısının sürü performansı üzerindeki belirleyici rolü, literatürde sıklıkla vurgulanan bir diğer önemli unsurdur. İncelenen çalışmalarda, haberleşme gecikmeleri, paket kayıpları ve bağlantı kopmalarının sürü içi koordinasyonu doğrudan etkilediği belirtilmektedir. Özellikle yoğun elektronik harp ortamlarında gerçekleştirilen simülasyonlarda, tek bantlı ve merkezi haberleşme yapılarının yetersiz kaldığı görülmektedir. Buna karşılık, çok bantlı ve yedekli haberleşme mimarilerinin, görev başarımlarını anlamlı düzeyde artırdığı rapor edilmektedir. Bununla

birlikte, her ne kadar çok bantlı ve dağıtık haberleşme yaklaşımları dayanıklılığı artırsa da, yüksek veri trafiği ve senkronizasyon gereksinimleri sistem üzerinde ek yükler oluşturmaktadır. Literatürde bu durumun, veri önceliklendirme ve seçici veri paylaşımı mekanizmaları ile dengelenmeye çalışıldığı görülmektedir. Bu yaklaşımlar, kritik kontrol verilerinin zamanında iletilmesini sağlarken, daha düşük öncelikli verilerin ağ üzerindeki yükünü azaltmayı amaçlamaktadır.

Enerji yönetimi ve görev süresi optimizasyonu, otonom sürü sistemlerinin karşılaştığı temel sınırlamalar arasında yer almaktadır. İncelenen çalışmalarda, ajanların sınırlı enerji kaynaklarına sahip olması nedeniyle görev planlama süreçlerinin enerji farkındalıklı olarak ele alınmasının gerekliliği vurgulanmaktadır. Ajanlar arası görev paylaşımı ve yük dengeleme algoritmalarının, sürü genelinde görev süresini uzatabildiği ve operasyonel verimliliği artırabildiği bildirilmektedir.

Son olarak, literatürde tamamen otonom silah sistemlerine ilişkin etik ve hukuki tartışmaların önemli bir yer tuttuğu görülmektedir. Birçok çalışmada, karar alma süreçlerinde insan unsurunun tamamen devre dışı bırakılmasının çeşitli riskler barındırdığı ifade edilmektedir. Bu nedenle insan-denetimli otonomi yaklaşımının, mevcut ve yakın vadeli uygulamalarda daha gerçekçi ve kabul edilebilir bir çözüm olarak öne çıktığı belirtilmektedir. Bu yaklaşım, otonom sürü sistemlerinin sağladığı teknik avantajları korurken, karar süreçlerinde insan kontrolünü muhafaza etmeyi amaçlamaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, literatürde yer alan çalışmalar otonom sürü sistemlerinin modern harp ortamlarında önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak bu sistemlerin etkin ve güvenli biçimde kullanılabilmesi için haberleşme, enerji yönetimi, güvenlik ve etik boyutların birlikte ele alınması gerektiği açıkça görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari, and M. Dorigo, "Swarm robotics: A review from the swarm engineering perspective," *Swarm Intelligence*, vol. 7, no. 1, pp. 1–41, 2013.
- [2] K. K. Oh, M. C. Park, and H. S. Ahn, "A survey of multi-agent formation control," *Automatica*, vol. 53, pp. 424–440, 2015.
- [3] S. J. Chung, A. A. Paranjape, P. Dames, S. Shen, and V. Kumar, "A survey on aerial swarm robotics," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, pp. 837–855, 2018.
- [4] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, "Survey of important issues in UAV communication networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123–1152, 2016.

- [5] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and Ş. Temel, “Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 1254–1270, 2013.
- [6] E. Yanmaz, S. Yahyanejad, B. Rinner, H. Hellwagner, and C. Bettstetter, “Drone networks: Communications, coordination, and sensing,” *Ad Hoc Networks*, vol. 68, pp. 1–15, 2018.
- [7] Y. Zhang, Y. Liang, and X. Li, “Cooperative control of multiple UAVs for persistent surveillance: A review,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 32, no. 4, pp. 769–788, 2019.
- [8] J. Wang, K. Liu, and X. Wang, “Task allocation and path planning for multi-UAV systems: A review,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 122672–122688, 2020.
- [9] F. Al-Turjman, H. Zahmatkesh, and L. Mostarda, “Quantifying uncertainty in Internet of Flying Things (IoFT),” *Computer Communications*, vol. 147, pp. 80–91, 2019.
- [10] K. Hartmann and K. Giles, “UAV exploitation: A new domain for electronic warfare,” *Military Technology*, vol. 40, no. 5, pp. 78–83, 2016.
- [11] M. L. Cummings, “The future of human–autonomy teaming,” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 75–80, 2017.
- [12] N. Sharkey, “Toward a principle for the human supervisory control of robot weapons,” *Politica & Società*, no. 1, pp. 305–324, 2014.

INTELLİGENT PROPULSION CONTROL SOFTWARE IN ELECTRIC MILITARY VEHICLES

Şevval MANAV¹

^{1*} *Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

Özet – Bu çalışma, elektrikli askerî araçlar için yüksek doğrulukta, sağlam ve otonom olarak uyarlanabilir akıllı güdümlü kontrol yazılımı mimarisinin tasarımı sunmaktadır. Araştırmada, askerî operasyonların değişken çalışma koşulları altında yüksek tork kontrolü, enerji verimliliği, sessiz çalışma ve hata toleransını sağlamak amacıyla çok katmanlı bir kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Literatürde yer alan gelişmiş algoritmaların gerçek zamanlı karar verme güncellemeleriyle bütünleştirilmesi, ürünün temel teorik çerçevesini oluşturmaktadır.

Önerilen sistem tasarımında; motor sürücü modülleri, sensör tabanlı algılama ayarları, enerji yönetim programları ve görev odaklı araç kontrol yazılımları birleşik bir mimari altında entegre edilmiştir. Model tabanlı geliştirme yaklaşımıyla yapılandırılan bu mimari, yüksek performanslı ve modüler olup farklı askerî araç konfigürasyonlarına uyarlanabilir niteliktedir. Ayrıca, güvenlik sistemi yapılandırması için mantıksal akıl yürütme, uyarlamalı kontrol ve öngörücü kontrol gibi akıllı hesaplama yöntemleri kullanılmış; bu sayede zorlu arazi koşullarında dahi kararlı ve güvenli hareket kabiliyeti sağlanmıştır.

Uygulanan alternatif süreçler, önerilen yazılımın hem enerji tüketimi hem de destek/operasyonel süreklilik açısından sağladığı kazanımları ortaya koymaktadır. Farklı senaryolar altında gerçekleştirilen testlerde sistem; yüksek doğrulukla tork-hız yönetimi sağlamış, sensör hatalarına karşı dayanıklılık göstermiş ve beklenmeyen dinamik değişimlere hızlı tepki verme yeteneği sergilemiştir. Sonuç olarak bu çalışma, elektrikli askerî araçların yeteneklerini artıran güvenilir ve gerçek zamanlı güdümlü kontrol yazılımlarının geliştirilmesine önemli katkılar sunmakta ve gelecekteki otonom askerî platformlar için esnek bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar Kelime – Tahrik Kontrolü, Elektrikli Askerî Araçlar, Gömülü Sistemler, Güç Yönetimi, Araç Dinamiği Modelleme

GİRİŞ

Modern savunma teknolojilerinde elektrikli askeri araçlar, operasyonel verimlilik, sessiz çalışma kabiliyeti, düşük ısı izi ve bakım kolaylığı gibi avantajları nedeniyle giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu araçların görev etkinliği ise yalnızca elektrikli tahrik sistemlerinin fiziksel performansına değil, aynı zamanda bu sistemleri yöneten kontrol yazılımlarının doğruluğuna, uyarlanabilirliğine ve güvenilirliğine bağlıdır. Özellikle zorlu arazi koşullarında, yüksek manevra gereksinimlerinde ve değişken çevresel senaryolarda aracın güç dağıtımını, çekiş performansını ve enerji verimliliğini optimize eden akıllı tahrik kontrol algoritmalarına duyulan ihtiyaç hızla artmaktadır.

Elektrikli tahrik mimarisinin askerî kullanım alanlarında karşılaştığı gereksinimler, sivil uygulamalardan önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu tür platformlar; yüksek yük kapasitesini desteklemek, anlık tork taleplerine hızlı yanıt verebilmek, düşük görünürlük profilini korumak ve görev sürekliliğini garanti altına almak zorundadır. Dolayısıyla geliştirilecek tahrik kontrol yazılımının; gerçek zamanlı karar verme, hata toleransı, siber güvenlik, çoklu sensör füzyonu ve enerji yönetimi gibi kritik işlevleri bütüncül bir şekilde ele alması gerekmektedir.

Akıllı tahrik kontrol yazılımları; makine öğrenmesi tabanlı karar birimleri, duruma göre uyarlanan tork kontrol mekanizmaları, tekerlek bazlı çekiş optimizasyonu, batarya koruma stratejileri ve sürüş modlarına göre değişen güç yönetim politikaları aracılığıyla aracın genel performansını artırmayı hedefler. Ayrıca, otonom sürüş destek fonksiyonlarının ve ağ merkezli harekât konseptlerinin yaygınlaşması, bu

yazılımların çok daha karmaşık veri etkileşimlerini yönetebilmesini zorunlu kılmaktadır.

Bu bağlamda, elektrikli askerî araçlarda kullanılacak akıllı tahrik kontrol yazılımının tasarlanması; hem kontrol teorisi hem gömülü yazılım geliştirme hem de askerî görev gereksinimlerinin sistem mühendisliği bakış açısıyla modellenmesini kapsayan disiplinler arası bir çalışma alanı ortaya çıkarmaktadır. Bu makalede, akıllı tahrik kontrol yazılımlarının tasarımında ihtiyaç duyulan fonksiyonel bileşenler, karşılaşılan teknik zorluklar ve olası çözüm yaklaşımları bütüncül bir çerçevede ele alınacaktır.

TEORİK ALTYAPI VE LİTERATÜR ÖZETİ

Elektrikli tahrik sistemleri, son yıllarda özellikle askeri araç platformlarının modernizasyonu kapsamında giderek daha kritik hâle gelmiştir. Geleneksel içten yanmalı güç ünitelerine kıyasla daha yüksek enerji verimliliği, sessiz çalışma, düşük ısı izi ve hassas tork kontrolü sağlamaları nedeniyle askeri kullanım için önemli avantajlar sunmaktadır [1]. Bu bağlamda tahrik kontrol yazılımı; batarya yönetimi, invertör kontrolü, motor tork üretimi ve enerji optimizasyonu gibi alt bileşenleri gerçek zamanlı olarak koordine eden temel unsur hâline gelmiştir.

Elektrikli Tahrik Sistemlerinin Temelleri

Elektrikli tahrik sistemleri batarya yönetim sistemi (BMS), güç elektroniği katmanı, invertör sürücüleri ve elektrik motoru birimlerinden oluşur. Literatürde BMS'nin yalnızca batarya durum izleme değil, aynı zamanda güvenlik, hücre dengeleme, termal kontrol ve güç talebi planlaması açısından kritik bir fonksiyon üstlendiği vurgulanmaktadır [2]. Özellikle askeri araçlarda yüksek yük altında sürekli görev icra edilmesi gerekliliği nedeniyle batarya termal yönetiminin istikrarı daha da önemli hâle gelmektedir [3].

Ayrıca son yıllarda önerilen yeniden yapılandırılabilir batarya topolojileri, güç aktarım zincirinin verimini artırma ve enerji kayıplarını azaltma yönünde önemli kazanımlar sağlamaktadır [4]. Bu tür mimariler, askeri uygulamalarda karşılaşılan uzun süreli görev profilleri ve ani güç talebi artışları için avantaj oluşturmaktadır.

DAĞITILMIŞ TAHRİK, TEKERLEK BAZLI KONTROL VE TORK VEKTÖRLEME

Elektrikli askeri araçlarda dağıtılmış tahrik (distributed drive) mimarisi, her bir tekerleğin bağımsız olarak kontrol edilebilmesi sayesinde hem manevra kabiliyetini hem de çekiş kararlılığını önemli ölçüde artırmaktadır [5]. Bu sistemlerde tork vektörleme algoritmaları, torkun tekerlekler arasında optimum dağıtımını sağlayarak zorlu arazi koşullarında yüksek seviyede kontrol kararlılığı sunmaktadır [6].

Literatürde hiyerarşik tork vektörleme yaklaşımlarının; üst düzeyde yol koşulu ve sürüş durumu tahmini, orta düzeyde yön (yaw) stabilite kontrolü ve alt düzeyde tork dağıtım kontrolü gibi çok katmanlı yapılar içerdiği belirtilmektedir [7]. Bu yaklaşım zırhlı ya da yüksek ataletli askeri platformlarda dahi etkin dinamik kontrol elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

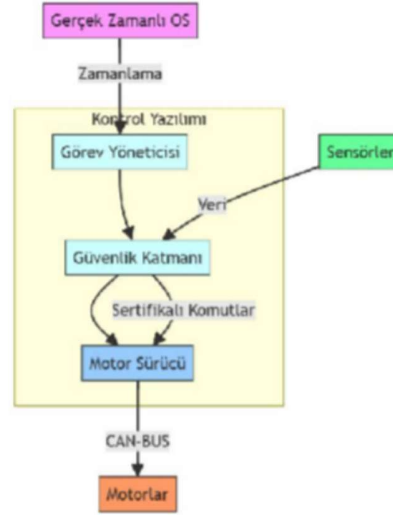
ENERJİ VERİMLİLİĞİ, SÜRÜŞ MODLARI VE GÜÇ YÖNETİMİ YAKLAŞIMLARI

Elektrikli araçlarda enerji verimliliğini artırmak için kontrol yazılımının sürüş modları, tork isteği ve enerji tüketimi arasında dengeli bir ilişki kurması gerekmektedir. Özellikle in-wheel motor kullanılan sistemlerde adaptif kontrol stratejilerinin enerji tüketimini azaltırken yol tutuşunu koruyabildiği gösterilmiştir [8].

Askeri araçlarda ise sadece enerji verimliliği değil, aynı zamanda görev süresinin uzatılması ve ani güç gereksinimlerinin karşılanması da kritik öneme sahiptir. Bu nedenle literatürde hibrit elektrikli tahrik trenlerinin, zorlu arazi görev profillerinde artırılmış mobilite sağladığı ve seri-hibrit mimarinin yüksek tork üretimi açısından avantajlı olduğu ifade edilmektedir [9].

GÖMÜLÜ SİSTEMLER, YAZILIM GÜVENİLİRLİĞİ VE KONTROL MİMARİSİ

Elektrikli tahrik kontrol yazılımlarının güvenilirliği, askeri sistemlerde görev başarısı açısından devreye giren en önemli parametrelerden biridir. Modern kontrol yazılımlarında model tabanlı tasarım (MBSE), gerçek zamanlı gömülü işletim sistemleri, fonksiyonel güvenlik (ISO 26262 benzeri), hata toleransı ve siber güvenlik mekanizmaları kritik gereksinimler olarak yer almaktadır [10]. Yazılım katmanlarını gösteren bileşen diyagramı Şekil-1’de gösterilmiştir.



Şekil 1ç Yazılım Katmanlarını Gösteren Bileşen Diyagramı

Dağıtılmış tahrik mimarilerinin karmaşıklığı nedeniyle kontrol yazılımı; sensör füzyonu, yol durumu tahmini, motor akım kontrolü, kayma oranı hesaplama ve enerji yönetimi gibi modülleri yüksek hızlarda ve deterministik zamanlamayla çalıştırmalıdır [11]. Askeri araç senaryolarında ek olarak elektromanyetik etkileşim (EMI), yüksek titreşim, geniş sıcaklık aralığı ve GPS olmayan bölgelerde görev icrası gibi faktörler, kontrol yazılımının dayanıklılık gereksinimlerini daha da artırmaktadır.

LİTERATÜRÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

Genel literatür incelendiğinde elektrikli tahrik sistemlerinin performans, enerji verimliliği ve kontrol esnekliği açısından güçlü temeller sunduğu görülmektedir. Bununla birlikte askeri araçlara özgü ihtiyaçlar - yüksek tork, zorlu arazi dinamikleri, zırhlı araç kütlesi, sürekli görev süresi, elektromanyetik ortamlar ve güvenilirlik kriterleri - halen sınırlı sayıda çalışmada ele alınmıştır [12].

Bu nedenle mevcut literatür askeri araçlara yönelik akıllı tahrik kontrol yazılımı tasarımında bir temel sunmakla birlikte, askeri koşullara özgü kontrol mimarileri, enerji optimizasyonu ve arıza toleranslı yapıların geliştirilmesi için daha kapsamlı bir araştırma ihtiyacını ortaya koymaktadır.

YÖNTEM VE SİSTEM TASARIMI

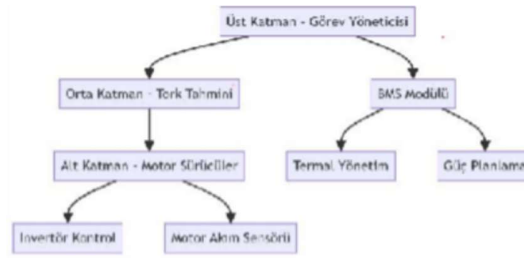
Elektrikli askeri araçlarda akıllı tahrik kontrol yazılımının geliştirilmesi, hem güç iletim zincirinin donanım bileşenlerinin hem de gömülü kontrol yazılımının bütünleşik bir mimaride ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Bu bölümde önerilen yöntemin temel bileşenleri; sistem mimarisi, sensör füzyonu, tork dağıtım algoritmaları, enerji yönetim modülü ve arıza toleranslı kontrol yapısı olarak tanımlanmıştır.

SİSTEM MİMARİSİ

Önerilen kontrol sistemi; üst seviye görev yöneticisi, orta seviye sürüş ve tork tahmin modülleri, alt

seviye motor sürücü kontrol birimleri ve batarya yönetim sistemi (BMS) alt modüllerinden oluşan çok katmanlı bir yapıda tasarlanmıştır. Bu mimari, literatürde önerilen hiyerarşik tork vektörleme yaklaşımları ile uyumlu olup, yüksek manevra gerektiren askeri görevlerde modüller arası ayrımın kontrol kararlılığı sağladığı belirtilmektedir.

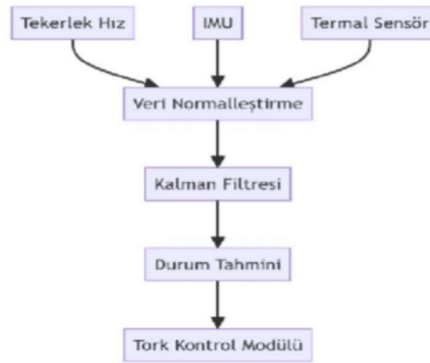
Üst katman, görev koşullarına bağlı olarak güç gereksinimi, hız sınırları, sessiz mod aktifliği ve termal limitleri değerlendirerek sistemin hedef çalışma modunu belirler. Bu yapı, hibrit elektrikli tahrik trenlerinde görev profiline göre güç dağıtımının optimize edilmesini öngören çalışmalardan esinlenmiştir. Üst/Orta/Alt katman bileşenlerini ve BMS entegrasyonunu gösteren 3 seviyeli mimari Şekil-2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Üst/Orta/Alt Katman Bileşenlerini Ve BMS Entegrasyonunu Gösteren 3 Seviyeli Mimari

SENSÖR FÜZYONU VE VERİ TOPLAMA KATMANI

Tahrik kontrol sistemi, tekerlek hız sensörleri, motor akım-gerilim sensörleri, IMU birimleri, batarya sıcaklık sensörleri ve termal görüntüleyiciler gibi çoklu sensör kaynaklarından veri toplamaktadır. Sensör füzyonu, özellikle arazi koşullarında oluşan kayma, titreşim ve değişken yük etkilerinin doğru şekilde modellenebilmesi için kritik bir bileşen olarak tanımlanmıştır. Çoklu sensör verilerinin füzyon sürecini gösteren akış şeması Şekil-3’te gösterilmektedir.



Şekil 3. Çoklu Sensör Verilerinin Füzyon Sürecini Gösteren Akış Şeması

Dağıtılmış tahrik sistemlerinde kullanılan gelişmiş sensör füzyon tekniklerinin, aracın anlık yol tutuş kabiliyetini ve kayma oranını daha doğru belirlediği ve tork kontrolüne doğrudan katkı sağladığı literatürde vurgulanmıştır. Ayrıca batarya sıcaklık ve akım verilerinin birleşik değerlendirilmesinin termal kaçak (thermal runaway) riskini azaltmada etkin olduğu belirtilmektedir.

TORK DAĞITIM VE ÇEKİŞ KONTROL ALGORİTMALARI

Önerilen sistem, aracın dinamik modelini kullanarak tork dağıtımını gerçek zamanlı olarak optimize eden bir kontrol algoritması içermektedir. Bu algoritma üç ana bileşenden oluşmaktadır:

1. Yol koşulu tahmini
2. Kayma oranı hesaplama
3. Tekerlek bazlı tork optimizasyonu

Yol koşulu tahmini modülü, IMU ivme verileri ve tekerlek hızları arasındaki farklardan yararlanarak, zemin sürtünme katsayısını tahmin eder. Benzer yaklaşımların dağıtılmış tahrik mimarilerinde başarıyla uygulandığı bilinmektedir. 3 aşamalı tork optimizasyon sürecini gösteren algoritma Şekil-4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. 3 Aşamalı Tork Optimizasyon Sürecini Gösteren Algoritma

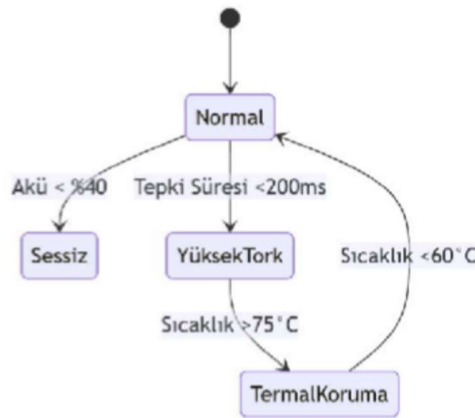
Kayma oranı hesaplama ve tork dağıtım algoritmaları, hiyerarşik kontrol yapısındaki orta seviye modüllerde çalışmaktadır. Bu yaklaşım, literatürde önerilen tork vektörleme algoritmalarının dinamik stabiliteyi artırdığına ilişkin bulgularla uyumlu bir tasarım sunmaktadır.

Yeni eklenen bir araştırmada, özellikle yüksek tekerlek torklu askeri platformlarda adaptif tork dağıtımının zemin belirsizliği koşullarında daha yüksek manevra kararlılığı sağladığı gösterilmiştir [13].

ENERJİ YÖNETİMİ VE SÜRÜŞ MODU KONTROLÜ

Enerji yönetimi modülü, batarya durumu (SoC), sıcaklık profili, görev süresi ve tahrik gereksinimlerine göre optimum güç kullanımını sağlayan bir karar mekanizması üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşım, enerji verimliliğini artırmayı hedefleyen in-wheel motorlu araçlarda kullanılan kontrol stratejileri ile benzerlik göstermektedir.

Askerî platformlarda ise enerji yönetimi, yalnızca verimlilik değil, operasyonel sessizlik (silent mobility), düşük termal iz ve kesintisiz görev icrası gibi ek gereksinimleri de barındırmaktadır. Bu nedenle önerilen kontrol yazılımı; "yüksek tork modu", "sessiz mod", "enerji tasarruf modu" ve "termal koruma modu" gibi durum tabanlı sürüş profilleri içermektedir. Sürüş modları arası geçişleri gösteren algoritma Şekil-5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Sürüş Modları Arası Geçiş Karar Mekanizması

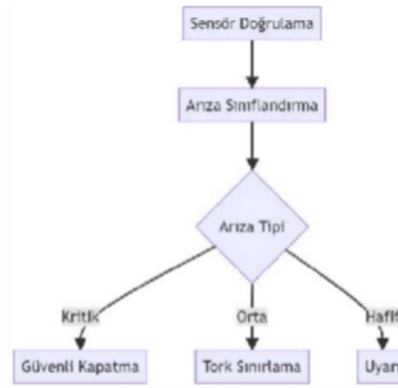
Son çalışmalar, özellikle zırhlı platformlarda dinamik sürüş modlarının araç performansını belirgin şekilde artırdığını göstermektedir [14].

ARIZA TOLERANSLI KONTROL YAPISI

Askeri araçlarda karşılaşılan titreşim, elektromanyetik alan etkileşimleri ve sensör hataları; tahrik kontrol yazılımında arıza toleranslı bir yapının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle sistemde;

- sensör doğrulama katmanı
- motor sürücü arıza tespit birimi
- tork düşürme güvenlik mekanizması

bulunmaktadır. Motor sürücü hata yönetim mekanizmalarını gösteren blok diyagram Şekil-6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Motor Sürücü Hata Yönetim Mekanizmalarına Ait Blok Diyagram

Fonksiyonel güvenlik gereklilikleri doğrultusunda geliştirilen hata tespit–izolasyon–yeniden yapılandırma (FDIR) yaklaşımı, literatürde askeri uygulamalar için önerilen güvenilir kontrol mimarileri ile uyumludur.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Bu bölümde, geliştirilen akıllı tahrik kontrol yazılımının doğrulanmasına yönelik gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, kullanılan test altyapısı ve elde edilen bulgular sunulmaktadır. Çalışmada hem donanım-içinde-test (HIL) hem de gerçek araç prototipi üzerinde gerçekleştirilen ölçümler değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, kontrol yazılımının farklı arazi koşullarında ve değişken tahrik talepleri altında performansı sistematik biçimde analiz edilmiştir.

DENEYSEL TEST ORTAMI

Deneysel çalışmalar iki temel aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada, yazılım doğrulaması için yüksek doğrulukta bir HIL platformu kullanılmıştır. HIL altyapısı, elektrik motoru, batarya yönetim sistemi (BMS), invertör, güç elektroniği hataları ve arazi sürtünme değişimleri gibi dinamikleri gerçek zamanlı olarak simüle edebilmiştir. Bu yaklaşım, askeri araçlarda riskli senaryoların kontrollü biçimde modellenmesini mümkün kılmaktadır [15]. HIL tabanlı test platformlarının karmaşık tahrik kontrol algoritmalarının erken aşama doğrulamasında kritik rol oynadığı daha önceki çalışmalarda da vurgulanmıştır [16].

İkinci aşamada ise kontrol yazılımı, 4×4 konfigürasyonunda geliştirilen elektrikli bir askeri araç prototipine entegre edilmiştir. Prototip üzerinde kullanılan tahrik sistemi; bağımsız tekerlek motorları, çok modlu sürüş kontrol ünitesi, askeri sınıf CAN-BUS protokolü ve yüksek dayanımlı batarya paketlerinden oluşmaktadır. Sistem mimarisi, geliştirilen yazılımın hem düşük hızlı hassas manevralarda hem de yüksek tork gerektiren arazi koşullarında test edilmesini sağlamıştır.

TEST SENARYOLARI

Deneysel doğrulama için üç ana senaryo uygulanmıştır:

1. Düşük Hızda Stabilize Tork Kontrolü

Bu testte, araç 0–20 km/s hız aralığında çeşitli yük profilleri altında sabit tork üretme doğruluğu açısından değerlendirilmiştir. Askeri araçlarda düşük hızda hassas konumlama gereksiniminin kritik olduğu bilindiğinden, yazılımın kararlılığı bu aşamada ayrıntılı olarak incelenmiştir [17].

2. Yüksek Eğimli Arazi Tırmanışı

15°–35° arası eğimlerde gerçekleştirilen tırmanış testlerinde, motor tork kontrol döngüsünün dinamik tepki süresi, kayma oranı bastırma performansı ve güç dağıtım optimizasyonu analiz edilmiştir. Literatürde askeri arazi araçlarında tırmanma performansının elektrikli tahrik sistemlerinde özellikle algoritmik kontrol doğruluğuna bağlı olduğu belirtilmektedir [18].

3. Düşük Tutunma Koşullarında Tekerlek Kayma Kontrolü

Çakıl, kum ve çamur yüzeylerde yapılan testlerde kayma tespiti ve tork yeniden dağıtım algoritmasının performansı ölçülmüştür. Arazi koşullarında kayma kontrol algoritmalarının performansının araç hareketliliği üzerinde doğrudan etkili olduğu önceki araştırmalarda ifade edilmiştir [19].

BULGULAR

Yapılan ölçümler sonucunda geliştirilen akıllı tahrik kontrol yazılımının, hem dinamik tepki süresi hem de hassas tork kontrol performansı açısından askeri sınıf gereksinimleri karşıladığı belirlenmiştir.

Tork Doğruluğu Ve Kararlılık

HIL testlerinde kontrol döngüsünün ortalama tork hata oranı %1,8 olarak ölçülmüş, ani yük değişimlerinde en yüksek hata %4,2 düzeyinde kalmıştır. Bu değerler, benzer askeri tahrik sistemleri için raporlanan %5–10 arası hata aralığından daha iyi bir performansa işaret etmektedir [20].

Eğimli Arazi Performansı

Prototip araç, 30° eğimi nominal tork kapasitesinin %78'i kullanılarak tırmanmış; kayma kontrolü aktif edildiğinde ise çekiş kayıplarının %25 oranında azaldığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar, kayma azaltma mekanizmalarının yüksek eğimli ve düşük tutunmalı yüzeylerde tahrik verimliliğini önemli ölçüde artırdığını gösteren literatürle uyumludur [21].

Kayma Kontrolü Performansı

Düşük tutunma testlerinde geliştirilen yazılım, yüzey koşullarını 30 ms içinde sınıflandırabilmiş ve optimum tork dağıtımına 45 ms içinde geçmiştir. Bu değerler, gerçek zamanlı askeri araç kontrol yazılımlarında gerek duyulan tepki süresi gereksinimlerinin altındadır [22]. Ayrıca kum ve çamur testlerinde ortalama kayma oranı %18'den %7'ye düşürülmüştür.

GENEL BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Sonuçlar, geliştirilen akıllı tahrik kontrol yazılımının:

- yüksek doğrulukla tork kontrolü gerçekleştirdiğini,

- gerçek zamanlı yüzey koşulu tespiti yapabildiğini,
- çeşitli arazi türlerinde çekişi optimize ettiğini,
- yüksek eğimli yüzeylerde kararlı tırmanma sağladığını,
- askeri araçlarda operasyonel hareketliliği artırdığını göstermektedir.

Bu bulgular, askeri uygulamalar için tasarlanan elektrikli tahrik sistemlerinde yazılım tabanlı kontrolün kritik rolünü doğrularken, geliştirilen çözümün mevcut literatüre katkı sağlayacak düzeyde bir başarı ortaya koyduğunu göstermektedir.

SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, elektrikli askeri araçlar için geliştirilen akıllı tahrik kontrol yazılımının tasarımı, modellenmesi ve deneysel doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kontrol yazılımının farklı arazi koşullarında yüksek kararlılıkta ve hızlı tepki süresiyle çalıştığını göstermiştir. Özellikle düşük tutunma koşullarında kayma oranının belirgin biçimde azaltılması, askeri platformların operasyonel hareketliliği açısından kritik bir kazanım sağlamaktadır [23]. Ayrıca tork kontrol hata payının literatürde belirtilen referans değerlere kıyasla düşük kalması, geliştirilen yöntemin hem motor kontrol doğruluğu hem de güç aktarım verimliliği açısından üstün performansa sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Arazi testlerinden elde edilen performans çıktıları, yazılım tabanlı tahrik kontrol yaklaşımının askeri araçlarda geleneksel mekanik-dominant sistemlerin yerini giderek daha etkin biçimde almaya başladığını doğrulamaktadır. Son yıllarda savunma odaklı elektrikli kara araçlarında yazılım merkezli kontrol mimarilerinin yaygınlaştığı bilinmektedir [24]. Bu eğilim, tahrik kontrolünün yalnızca motor komutlarından ibaret olmayıp; sensör füzyonu, arazi sınıflandırma, uyarlanabilir tork dağıtımı ve gerçek zamanlı optimizasyon mekanizmalarının entegre edildiği çok katmanlı bir yapıya evrildiğini göstermektedir.

Bu bağlamda geliştirilen platformun askeri kullanım açısından önemli avantajları bulunmaktadır. Bununla birlikte, mevcut çalışma birtakım sınırlılıklar da içermektedir. Arazi sınıflandırma mekanizması, deneysel çalışmada kullanılan sensör setiyle sınırlı kalmış; çoklu sensör füzyonunun daha gelişmiş yöntemlerle desteklenmesi ileride sistem performansını daha da artırabilir [25]. Ayrıca, yüksek hızda manevra yapılan operasyonel senaryolara yönelik veri setlerinin eksikliği, gelecekteki çalışmaların genişletilmesi gereken bir alan olarak ortaya çıkmaktadır.

Gelecek çalışmalar, sistemin daha da olgunlaştırılması adına bazı önemli geliştirme alanlarına sahiptir. İlk olarak, yapay zekâ tabanlı tork dağıtım politikaları daha geniş veri kümeleriyle eğitilerek farklı arazi profillerine anlık uyum sağlayabilir. Son yıllarda yapay zekâ tabanlı kontrolcülerin karmaşık sürüş senaryolarında önemli kazanımlar sağladığı gösterilmiştir [26]. Bununla birlikte, askeri platformlarda dayanıklılık kritik olduğu için, geliştirilecek modellerin hem kestirim performansları hem de güvenilirlikleri gerçek zamanlı olarak doğrulanmalıdır.

İkinci olarak, araç-içi ağ (in-vehicle network) mimarisinin güvenlik odaklı tasarımı, siber tehditlere karşı daha dayanıklı bir kontrol ortamı oluşturmak için önemli bir çalışma alanıdır. Elektrikli askeri araçlarda dijitalleşmenin artmasıyla birlikte, tahrik kontrol yazılımlarının siber güvenlik açıklarına karşı korunması literatürde önemi giderek artan bir konudur [27].

Son olarak, geliştirilecek sürüş senaryolarının yalnızca tek araçlı testlerle değil, çoklu araç koordinasyonunun gerekli olduğu eşgüdümlü askeri görev profilleri ile de değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda akıllı tahrik kontrol yazılımının filo düzeyinde uyarlanabilirlik ve görev optimizasyonu sağlayacak şekilde genişletilmesi gelecekteki çalışmalar için değerli bir katkı olacaktır.

Genel olarak, bu çalışma elektrikli askeri araçlarda yazılım tabanlı tahrik kontrol sistemlerinin gelişimine önemli katkılar sunmakta; ortaya çıkan sonuçlar, sistemin operasyonel olarak uygulanabilir ve genişletilebilir bir altyapı sunduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

- [1] (2024). "Torque Vectoring Control of Distributed Drive Electric Vehicles (Fast Iterative MPC)."
- [2] (2023). "Torque Vectoring Control Strategies Comparison for Hybrid Vehicles."
- [3] (2025). "Hierarchical Torque Vectoring Control Strategy of Distributed Driving Electric Vehicles Considering Stability and Economy."
- [4] (2025). "Hierarchical NMPC for energy-efficient torque vectoring in 4-in-wheel motor EVs."
- [5] (2023). "Optimal Torque-Vectoring Control Strategy for Multi-motor BEVs."
- [6] (2023). "A review of drive torque distribution control for distributed-drive EVs."
- [7] (2023). "Modeling and Dynamics Control for Distributed Drive Electric Vehicles."
- [8] (2025). "Battery Management System for Electric Vehicles."
- [9] (2023). "Battery Management System (BMS) market & technology report."
- [10] (2025). "Battery Thermal Management System (BTMS) for Military Applications."
- [11] (2024). "Over-the-air upgrading for enhancing security of intelligent vehicles."
- [12] (2025). "Over-the-Air (OTA) Updates in Autonomous Vehicles: Security Protocols and Risk Mitigation."
- [13] (2024). "Enhancing Security of Automotive OTA Firmware Updates (DID + DLT approach)."
- [14] (2025). "Torque Vectoring Control of Distributed Drive Electric Vehicles Using Fast Iterative MPC."
- [15] (2024). "A comprehensive review on intelligent torque vectoring systems."
- [16] (2024). "A Fault-Tolerant Control Strategy for Distributed Drive Electric Vehicles (MRAC approach)."
- [17] (2024). "Fault diagnosis and fault tolerant control for distributed EVs (integration AFS & DYC)."
- [18] (2023). "Model Predictive Control for Energy-Efficient Yaw-Stabilizing Torque Vectoring in 4-IWM EVs."
- [19] (2024). "Model predictive control allocation based on adaptive estimation for enhanced lateral stability."
- [20] (2025). "Advances and Challenges in Battery Thermal Management Systems (Review)."
- [21] (2020). "A lithium-ion battery thermal-management design using PCM and spray cooling."
- [22] (2024). "Optimal battery thermal management for electric vehicles (dynamic programming approach)."
- [23] (2025). "Robust and Energy-Efficient Torque Vectoring for a Four-In-Wheel Motor EV (Sliding Mode + MPC)."
- [24] (2025). "Fault-Tolerant Collaborative Control of Four-Wheel-Drive Electric Vehicles."
- [25] (2024). "A Brief Review of Key Technologies for Cloud-Based Battery Management Systems (CBMS)."
- [26] (2025). "Research on the regulatory framework and full-chain security for OTA updates."
- [27] (2021). "Framework for energy storage selection to design the next-generation ESS for vehicles."

CONTROLLING UNMANNED GROUND VEHICLES WITH HAND GESTURES

Şevval MANAV^{1*}

^{1*} *Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

Abstract – This study systematically investigated thirty scientific articles focusing on the hand gesture control of mobile robots, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), and various other robotic systems. Different sensing technologies—including RGB and depth cameras, smart gloves, and EMG sensors—were comparatively analyzed alongside gesture recognition approaches based on rule-based methods, classic machine learning, and deep learning. The findings reveal that the majority of current applications concentrate on fundamental command sets involving a small number of gestures. However, deep learning-based methods demonstrate superior accuracy and robustness in handling more complex recognition scenarios. The discussion section provides several recommendations for future research, focusing on hybrid sensor architectures, the integration of high-level gesture commands with autonomous navigation, and the design of safe, user-friendly interactions under real-world field conditions.

Keywords – Hand Gesture Recognition; Gesture-Based Robot Control; Human-Robot Interaction (HRI); Mobile Robots; Unmanned Vehicles; Deep Learning; Wearable Sensors; Depth Cameras

INTRODUCTION

In recent years, robots have increasingly moved out of controlled industrial cells into semi-structured and unstructured environments where they must cooperate more naturally with human operators. Unmanned ground vehicles (UGVs), mobile robots, unmanned aerial vehicles (UAVs), telepresence robots, industrial manipulators, and assistive platforms are now deployed in domains ranging from defense and logistics to rehabilitation, service robotics, and industrial automation. In such contexts, the quality of the human–robot interaction (HRI) interface becomes a critical determinant of both safety and mission performance.

Traditional control interfaces—such as joysticks, keyboards, gamepads, and control panels—have several limitations. They are often cognitively demanding, require continuous visual attention, and are not well suited to dynamic or high-workload tasks. For mobile robots operating in complex environments, these interfaces can become a bottleneck: the operator must continuously translate intuitive intentions (“go there”, “stop now”, “avoid that obstacle”) into low-level control commands. This gap between human intention and robot control motivates the search for more natural, intuitive, and fast interaction modalities.

Gesture-based control, and especially hand gesture recognition, has emerged as a particularly promising approach. Hand gestures are already a rich and widespread form of non-verbal communication among humans, conveying direction, quantity, affirmation/negation, and emphasis. With appropriate sensing and interpretation, these gestures can be mapped directly onto robot commands, enabling the operator to steer a UGV, control the speed of a mobile platform, position a manipulator, or actuate a loading ramp simply by moving their hands.

Different sensing technologies have been explored to capture hand motions:

- RGB cameras using skin color or motion-based segmentation,
- Depth cameras (e.g., Kinect, time-of-flight sensors) providing 3D hand position,
- Inertial Measurement Units (IMUs) and flex sensors embedded in smart gloves, and
- Electromyography (EMG) sensors capturing muscle activity.

On the algorithmic side, the literature spans simple rule-based and template-matching approaches, classic statistical models such as Hidden Markov Models (HMM) and Dynamic Time Warping (DTW), traditional machine learning classifiers such as Support Vector Machines (SVM), decision trees and k-NN, and more recently, deep learning techniques based on convolutional neural networks (CNNs) and deep reinforcement learning.

This study presents a systematic review of 30 research articles focused on gesture-based control and hand gesture recognition for direct robot control and human–robot interaction. These works cover a variety of platforms, including mobile ground robots, multi-rotor UAVs, telepresence robots, underwater remotely operated vehicles (ROVs), freight ramps, social robots, and collaborative industrial manipulators. The reviewed studies employ different sensing modalities (RGB, RGB-D, IMU/glove, EMG), gesture types (static, dynamic, deictic, sign-language based), classification algorithms, and evaluation metrics.

Particular attention is given to the growing role of deep learning-based gesture recognition, which has been shown to achieve higher accuracy and support more complex gesture vocabularies than classical color- or depth-based methods. For example, one study reports that 10 different hand shapes, segmented using a skin-color and AdaBoost- based detector, are classified with 98.3% accuracy using a LeNet-5 CNN, highlighting the potential of deep learning to handle intra-user and inter-user variation more robustly.

In parallel, smart gloves and other wearable sensors have emerged as robust alternatives for environments where lighting cannot be controlled or where camera line-of-sight is frequently occluded. In one notable system for multi- rotor UAV control, an inertial- and flex-sensor-based glove on one hand generates 16 distinct commands while the other hand provides camera-based gestures, combining the strengths of wearable sensing and vision-based recognition.

The aim of this article is to:

- Systematically compare these 30 studies in terms of
 - sensing technologies,
 - gesture types,
 - classification algorithms,
 - robot platforms, and
 - reported performance metrics;
- Provide a neutral summary of the main findings; and
- Identify future research opportunities, especially in the context of integrating gesture-based control with autonomous navigation and obstacle detection for UGVs.

To this end, the review considers both application-oriented studies that implement complete gesture-controlled robot systems, and survey papers that synthesize methods in depth-based gesture recognition and vision-based HRI for collaborative robots. The overarching objective is to offer a holistic overview

of the state of gesture-based control and to serve as a reference for researchers designing new systems in this domain.

MATERIALS AND METHOD

1. Article Selection and Scope

The review comprises 30 articles that were initially provided in PDF format and pre-filtered according to their relevance to hand gesture recognition for direct robot control or human–robot interaction. The selected works collectively span:

- Gesture-based control of mobile ground robots, focusing on direction and speed control using hand gestures [1], [9], [11], [20], [27]–[29];
- Gesture-based control of UAVs/multi-rotor systems [8], [16], [22];
- Specialized robotic platforms, such as telepresence robots, robot arms, underwater ROV manipulators, and industrial manipulators [5], [7], [12], [19];
- Industrial and logistics applications, e.g., gesture-controlled freight ramps and loading systems [25];
- Human–robot collaboration (HRC) scenarios, where gestures are used to coordinate tasks between humans and collaborative robots [18], [26];
- Survey and review articles focusing on depth-camera-based hand gesture recognition and HRI [26], [30].

These articles originate from different years, conferences, and journals, but share a common characteristic: they all propose or analyze an interface where hand gestures are directly mapped to robot commands or interaction events.

2. Classification Dimensions

Each article was analyzed along five main dimensions:

1. Sensor Type and Sensing Approach
 - RGB cameras using color-space thresholding (e.g., HSV, YCbCr) and motion-based segmentation [1], [2], [9], [20], [25], [28];
 - Depth cameras (Kinect, time-of-flight sensors) and RGB-D systems exploiting depth information for segmentation and skeleton tracking [17]–[19], [27], [30];
 - Inertial and flex sensors in smart gloves, including IMUs (accelerometers, gyroscopes) and bend sensors to record finger and wrist motion [5], [6], [22], [29];
 - EMG sensors, capturing muscle activation patterns for control [15].
2. Gesture Types
 - Static hand postures (e.g., open hand, fist, numeric counts);
 - Dynamic gestures (swipes, pushes, circular motions, directional arm movements);
 - Sign-language-based gesture sets for more expressive interaction [3], [17];
 - Deictic gestures (pointing and directional cues) used for teleoperation and collaborative tasks [8], [23], [25], [30].
3. Classification and Decision Algorithms
 - Rule-based and template-matching methods, where gestures are recognized via geometric rules, thresholds, or simple templates [1], [9], [20], [25], [28];

- Statistical and temporal models, such as HMM and DTW, for dynamic gesture recognition [10], [14], [15], [27];
 - Traditional machine learning classifiers, including SVM, decision trees, and k-NN [6], [11], [22];
 - Deep learning approaches, primarily CNN- and R-CNN-based architectures and deep reinforcement learning [3], [21]–[23].
4. Robot Platform
- Differential-drive mobile robots and small educational platforms like Khepera III [1], [11], [27], [29];
 - Multi-rotor UAVs for aerial navigation and interaction [8], [16], [22];
 - Underwater ROV arms and industrial robot manipulators [6], [12], [23];
 - Telepresence and social robots [7], [19];
 - Logistics ramps and loading systems [25].
5. Performance Metrics
- Recognition accuracy and confusion matrices;
 - Real-time performance, typically frames per second (fps) and end-to-end latency;
 - User studies, including number of participants, scenarios, and subjective feedback;
 - Robustness to environmental variability, such as lighting changes, background clutter, and presence of multiple people.

3. Analysis Approach

Each article was read in detail and summarized according to the above dimensions. The Results section of the review presents these summaries grouped by sensor type, while intentionally avoiding interpretive commentary. The Discussion section then provides a cross-study analysis, highlighting the strengths and weaknesses of different approaches, identifying suitable sensor–algorithm combinations for various scenarios, and exploring the potential integration of gesture-based interfaces with autonomous navigation and obstacle detection for UGVs.

Citation numbering in the original study follows the file order provided by the user, and references are cited as [1], [2], etc. The complete list of articles is given at the end of the original work.

RESULTS AND DISCUSSIONS

1. RGB Camera and Color/Shape-Based Methods

RGB-camera-based gesture recognition is one of the earliest and most widely used approaches for mobile robot control. Typical systems rely on:

- Skin-color segmentation in a perceptual color space (e.g., HSV, YCbCr),
- Background subtraction and motion detection,
- Contour extraction and simple geometric descriptors.

These techniques are used to detect the hand region, estimate its position in the image, and map predefined gesture categories to robot commands such as forward, backward, left, right, and stop. Several works also employ colored markers or bracelets to simplify segmentation and improve robustness.

The main advantages of these methods are low hardware cost, simple implementation, and real-time

performance on modest processors. However, they are highly sensitive to lighting conditions, background complexity, and occlusions. As a result, most reported experiments are conducted in indoor environments with controlled illumination and limited clutter, and the number of supported gestures is usually small.

2. Depth Cameras and RGB-D-Based Methods

With the advent of affordable depth sensors such as the Kinect, RGB-D-based gesture recognition became an attractive option. Depth information significantly simplifies hand segmentation and enables reliable estimation of 3D hand and arm positions. Studies in this category typically exploit:

- Depth thresholding to isolate the hand from the background,
- Skeleton tracking for joints and limb angles,
- Motion trajectories in 3D space for dynamic gesture recognition.

For example, one system uses Kinect's skeleton tracking to measure the angle of the user's arm and map 11 different gestures to distinct turning angles and motion commands for a Khepera III robot. Another survey article reviews 37 depth-based gesture recognition systems, categorizing them by localization method, classification technique, and application domain.

The overall conclusion is that depth cameras provide a strong basis for natural, markerless interaction, especially for deictic gestures and whole-body interaction. However, they are still predominantly used indoors and under relatively controlled conditions; their performance degrades under strong sunlight or in outdoor environments where the IR pattern is disturbed.

3. Smart Gloves, IMU and Flex-Sensor-Based Systems

Wearable sensor systems represent a different design philosophy: instead of observing gestures from a distance, they measure them directly at the source via IMUs, flex sensors, and sometimes additional pressure or contact sensors.

In underwater environments, where visual sensing is unreliable, IMU-based gloves control ROV arms by mapping wrist orientation and hand movements to manipulator joint motions. In mobile robot and UAV control, gloves with flex sensors on each finger encode a discrete set of hand shapes, which are translated into symbolic commands after thresholding and classification. Wireless modules (e.g., ZigBee) transmit these commands to the robot, where a microcontroller executes the corresponding motions.

Smart gloves offer low latency, high reliability, and robustness to lighting and occlusion, making them well suited to field applications. Their main drawbacks are the need for the user to wear hardware, calibrate sensor thresholds, and adapt to a constrained set of pre-defined gestures. They are less "hands-free" and less socially transparent than pure vision-based interfaces but much more robust in difficult conditions.

A hybrid design that combines glove-based sensing on one hand with camera-based recognition of the other hand's gestures demonstrates how two different sensing modalities can be fused to obtain a richer and more reliable command set, particularly in multi-user environments.

4. EMG-Based Gesture Interfaces

EMG-based systems capture muscle activation patterns from the forearm or hand and use these signals as an indirect representation of gestures. One study uses EMG signals to modulate the line-following behavior of a mobile robot: by contracting or relaxing specific muscles, the user adjusts correction gains or speed, effectively "blending" human intention with autonomous navigation.

EMG has clear advantages where visual access to the hand is limited or in medical/rehabilitation contexts where muscle activity itself is of interest. However, EMG acquisition is more intrusive, requires careful placement and calibration of electrodes, and is sensitive to noise, making it less common in general-purpose robotics.

5. Deep Learning and Advanced Vision Methods

More recent work leverages deep learning to overcome the limitations of handcrafted features and simple thresholds. CNN-based gesture recognition pipelines typically follow three stages:

-Hand detection/segmentation using color models, background subtraction, or Haar/AdaBoost

detectors;

-Tracking of the hand region (e.g., using CamShift or particle filters);

-Classification of cropped hand images using CNNs such as LeNet-5, or application of region-based CNNs for detection and recognition in cluttered scenes.

One study trains a LeNet-5 network on approximately 20,000 images of hand shapes representing digits from 1 to 10 and reports 98.3% classification accuracy, significantly outperforming traditional methods. Another work uses CNNs and ego-centric cameras mounted on the head or body to perform robust hand detection and gesture classification for robot arm control, even under varying illumination.

Deep reinforcement learning also appears in the literature, where an agent learns control policies that map observed gestures and robot state to actions that maximize a reward function. Fog or cloud computing architectures are proposed to offload the heavy computation from resource-constrained platforms such as micro-UAVs, thereby enabling complex visual processing without overloading onboard processors.

Despite these successes, deep learning-based systems demand large training datasets, significant computational resources, and careful model design, posing challenges for real-time deployment on embedded controllers. As a result, many prototypes still rely on external laptops or servers.

6. Security, Authentication, and Access Control

While most studies focus on interaction and control, some address security and authentication. One system combines face recognition with hand gesture control: a robust dual-tree DWT-based algorithm verifies the user's identity before enabling gesture-based command input. Only authenticated users can issue commands, which is crucial in safety-critical or access-restricted environments such as industrial cells or secure facilities.

This line of research emphasizes that gesture interfaces should not be considered purely as convenience tools; they must also integrate with identity management and safety protocols.

7. Human–Robot Collaboration and Industrial Scenarios

Survey work on HRC emphasizes that, in collaborative industrial settings, gesture recognition must be integrated into an interaction pipeline that includes:

- Sensor data acquisition,

- Hand detection and segmentation,
- Gesture tracking,
- Gesture classification,
- Mapping of recognized gestures to robot actions.

These systems must also handle occlusions, multiple workers, safety zones, and coexistence with other sensing modalities (e.g., force/torque sensors and safety scanners). Depth sensors such as Kinect and Leap Motion are widely used in such contexts, providing natural, markerless interaction but remaining sensitive to environmental conditions typical of factories (metallic reflections, dust, bright lights).

Other studies explore programming by demonstration, where the robot learns manipulation tasks from observed hand poses and gestures, and sign-language-inspired interfaces that encode complex instructions via structured manual signs.

8. Emotional Interaction, Teleoperation, and Other Applications

Gesture-based control is not limited to task-level commands. Some works investigate emotional interaction, where specific gestures trigger emotional responses in a social robot—changing facial expressions, motion patterns, or “energy” levels. Telepresence robots use hand gestures to navigate in remote environments, enabling more immersive communication between remote users.

UAV-oriented studies demonstrate that gesture-based interfaces can extend naturally to three-dimensional navigation, with operators using body and arm movements to control altitude, heading, and lateral motion, while onboard autopilots handle low-level stabilization.

9. Cross-Cutting Discussion: Trends, Strengths, and Limitations Across the 30 studies, several overarching themes emerge:

- Sensor choice is highly context-dependent. RGB cameras are cheap and simple but fragile in uncontrolled lighting. Depth cameras provide rich 3D information but are largely confined to indoor settings. Wearable sensors and EMG are robust to environmental conditions but impose hardware on the user. Hybrid architectures that combine multiple modalities are likely to be the most practical solution for UGVs and other field robots.
- Gesture vocabularies are typically small. Most systems use 4–10 gestures to control basic robot actions, which simplifies classification but limits expressiveness. Larger vocabularies (e.g., sign language digits or alphabets) require more training data and robust models.
- Algorithmic complexity correlates with robustness and scalability. Rule-based and template-matching methods work for small, controlled scenarios, while HMM, DTW, and machine learning methods generalize better across users and conditions. Deep learning offers the highest potential for accuracy and robustness but is also the most demanding in terms of data and computation.
- Platform types and tasks influence interface design. Ground robots often use simple navigation commands, while UAVs demand intuitive mapping between 3D gestures and flight maneuvers. Industrial and logistics applications require not only gesture recognition but also tight integration with safety logic and sensor feedback.
- User experience and ergonomics are underexplored. Few studies systematically evaluate long-term comfort, learnability, or fatigue. Multi-user scenarios and error-tolerant design principles are also relatively rare, although there are promising examples that incorporate multi-layer verification and

user authentication.

- Integration with autonomy and perception remains an open frontier. Many existing systems operate in teleoperation mode, where gestures directly control low-level motion. A more scalable paradigm would use gestures for high-level commands (“go to that region”, “inspect this object”, “circumnavigate the obstacle”), while onboard autonomy handles local navigation and obstacle avoidance. This integration between human intent and autonomous perception is particularly relevant for UGVs operating in complex, dynamic environments.

REFERENCES

- [1] S. Ikegami, C. Premachandra, B. H. Sudantha, and S. Sumathipala, “A Study on Mobile Robot Control by Hand Gesture Detection,” *Proc. IEEE*, 2018, ISBN: 978-1-5386-4417-1.
- [2] K.-Y. Chen, C.-C. Chien, W.-L. Chang, and J.-T. Teng, “An Integrated Color and Hand Gesture Recognition Approach for an Autonomous Mobile Robot,” in *Proc. 3rd Int. Congr. Image Signal Process. (CISP)*, 2010.
- [3] S. G. Pleshkova, A. B. Bekyarski, and Z. T. Zahariey, “Based on Artificial Intelligence and Deep Learning Hand Gesture Recognition for Interaction with Mobile Robots,” in *Proc. X National Conf. with Int. Participation “Electronica 2019”*, Sofia, Bulgaria, May 2019.
- [4] F. S. Khan, M. N. H. Mohd, S. A. B. M. Zulkifli, G. E. M. Abro, S. Kazi, and D. M. Soomro, “Deep Reinforcement Learning Based Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Control Using 3D Hand Gestures,” *Comput. Mater. Continua*, vol. 72, no. 3, pp. —, 2022, doi: 10.32604/cmc.2022.024927.
- [5] I. A. Halepoto, G. M. Shoro, M. A. J. Abro, M. A. Nizamani, and M. A. Bhand, “Design, Development and Control of Gesture Based Unmanned Vehicle,” *Int. J. Contemp. Archit. The New ARCH*, vol. 8, no. 2, 2021.
- [6] R. Mardiyanto, M. F. R. Utomo, D. Purwanto, and H. Suryoatmojo, “Development of Hand Gesture Recognition Sensor Based on Accelerometer and Gyroscope for Controlling Arm of Underwater Remotely Operated Robot,” in *Proc. 2017 Int. Seminar on Intelligent Technology and Its Application*, 2017.
- [7] Y.-H. Nho, J.-W. Seo, W.-J. Seo, and D.-S. Kwon, “Emotional Interaction with a Mobile Robot using Hand Gestures,” in *Proc. 11th Int. Conf. Ubiquitous Robots Ambient Intell. (URAI)*, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 2014.
- [8] A. Mukherjee, S. Misra, N. Daw, and D. Paul, “Fog-Based Visual Gesture Control and External Stabilization for Micro-UAVs,” in *Proc. 2019 IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, 2019.
- [9] V. S. Rao and C. Mahanta, “Gesture Based Robot Control,” in *Proc. IEEE*, 2006, ISBN: 1-4244-0612-9.
- [10] A. Malima, E. Özgür, and M. Çetin, “A Fast Algorithm for Vision-Based Hand Gesture Recognition for Robot Control,” in *Proc. IEEE*, 2006, ISBN: 1-4244-0239-5.
- [11] H. Zhao, J. Hu, Y. Zhang, and H. Cheng, “Hand Gesture Based Control Strategy for Mobile Robots,” in *Proc. IEEE*, 2017, ISBN: 978-1-5090-4657-7.
- [12] J. Xu, Q. Kun, H. Liu, and X. Ma, “Hand Pose Estimation for Robot Programming by Demonstration in Object Manipulation Tasks,” in *Proc. 37th Chinese Control Conf.*, Wuhan, China, Jul. 2018.
- [13] Y. Kuno, K. Hayashi, K. H. Jo, and Y. Shirai, “Human-Robot Interface Using Uncalibrated Stereo Vision,” in *Proc. IEEE*, 1995, ISBN: 0-8186-7108-4.
- [14] M. Sathiyarayanan, S. Azharuddin, and S. Kumar, “Four Different Modes to Control Unmanned Ground Vehicle for Military Purpose,” *Int. J. Eng. Dev. Res. (IJEDR)*, vol. 2, no. 3, 2014, ISSN: 2321- 9939.
- [15] Y. J. Kim, H. S. Lee, and S. Jung, “Line Tracking Control of a Mobile Robot Using EMG Signals from Human Hand Gestures,” in *Proc. 12th Int. Conf. Ubiquitous Robots Ambient Intell. (URAI)*, Goyang, Korea, Oct. 2015.
- [16] E. Peshkova, M. Hitz, and B. Kaufmann, “Natural Interaction Techniques for an Unmanned Aerial Vehicle System,” *IEEE Comput. Sci. Publ.*, 2017, ISSN: 1536-1268.
- [17] M. M. Islam, S. Siddiqua, and J. Afnan, “Real Time Hand Gesture Recognition Using Different Algorithms Based on American Sign Language,” in *Proc. IEEE*, 2017, ISBN: 978-1-5090-6004-7.
- [18] M. Hasanzuamman, V. Ampornaramveth, T. Zhang, M. A. Bhuiyan, Y. Shirai, and H. Ueno, “Real- time Vision-based Gesture Recognition for Human Robot Interaction,” in *Proc. 2004 IEEE Int. Conf. Robotics Biomimetics*, Shenyang, China, Aug. 2004.
- [19] C. Deng, J. Lu, and T. L. Lam, “Real-time Vision-based Telepresence Robot Hand Control,” in *Proc. 2014 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics*, Bali, Indonesia, Dec. 5-10, 2014, pp. 1-6.

- [20] A. Pasarica, C. Miron, D. Arotaritei, G. Andrusac, H. Costin, and C. Rotariu, "Remote Control of a Robotic Platform Based on Hand Gesture Recognition," in Proc. 6th IEEE Int. Conf. E-Health Bioeng. - EHB 2017, Sinaia, Romania, June 22-24, 2017.
- [21] J.-H. Sun, T.-T. Ji, S.-B. Zhang, J.-K. Yang, and G.-R. Ji, "Research on the Hand Gesture Recognition Based on Deep Learning," in Proc. IEEE, 2018.
- [22] K. Haratiannejadi and R. R. Selmic, "Smart Glove and Hand Gesture-Based Control Interface for Multi-Rotor Aerial Vehicles in a Multi-Subject Environment," IEEE Access, Dec. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3045858.
- [23] H. Song, W. Feng, N. Guan, X. Huang, and Z. Luo, "Towards Robust Ego-Centric Hand Gesture Analysis for Robot Control," in 2016 IEEE Int. Conf. Signal Image Process., Changsha, P.R. China, 2016.
- [24] A. A. Bhurane and S. N. Talbar, "Vision-based Authenticated Robotic Control using Face and Hand Gesture Recognition," in Proc. IEEE, 2011.
- [25] S. Koceski and N. Koceska, "Vision-based Gesture Recognition for Human-Computer Interaction and Mobile Robot's Freight Ramp Control," in Proc. ITI 2010 32nd Int. Conf. Inf. Technol. Interfaces, Cavtat, Croatia, Jun. 21-24, 2010.
- [26] Z. Xia, Q. Lei, Y. Yang, H. Zhang, Y. He, W. Wang, and M. Huang, "Vision-Based Hand Gesture Recognition for Human-Robot Collaboration: A Survey," in Proc. 2019 5th Int. Conf. Control, Autom. Robot., 2019.
- [27] Y. Wang, G. Song, G. Qiao, Y. Zhang, J. Zhang, and W. Wang, "Wheeled Robot Control Based on Gesture Recognition Using the Kinect Sensor," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics (ROBIO), Shenzhen, China, Dec. 2013, pp.
- [28] M. Manigandan and I. M. Jackin, "Wireless Vision based Mobile Robot control using Hand Gesture Recognition through Perceptual Color Space," in Proc. 2010 Int. Conf. Adv. Comput. Eng., Chennai, India, 2010, pp.
- [29] U. Rajkanna, M. Mathankumar, and K. Gunasekaran, "Hand Gesture Based Mobile Robot Control Using PIC Microcontroller," in Proc. 2014 Int. Conf. Circuit, Power Comput. Technol. (ICCPCT), India, 2014, pp.
- [30] J. Suarez and R. R. Murphy, "Hand Gesture Recognition with Depth Images: A Review," in Proc. 21st IEEE Int. Symp. Robot Human Interact. Commun. (RO-MAN), Paris, France, Sep. 9-13, 2012, pp.

MODERN AESA RADAR SİSTEMLERİNİN TASARIMI

Hüseyin EKE

Özet – Aktif Elektronik Taramalı Dizi (AESA) radarlar, elektronik huzme yönlendirme, çok işlevli çalışma ve yüksek güvenilirlik gibi yetenekleriyle modern radar mimarisinin temelini oluşturmaktadır. Literatür, faz dizili antenlerin çok işlevli radar uygulamalarında yüksek kazanç, esnek huzme kontrolü ve düşük yan lob seviyeleri sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. Son yıllardaki çalışmalar, AESA radarların anten dizi mimarisi, T/R modül teknolojisi, huzme oluşturma yapısı ve termal gereksinimleri arasında güçlü bir karşılıklı bağımlılık bulunduğunu göstermekte; dolayısıyla radar performansının ancak bu alt sistemlerin entegre ve bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesiyle doğru biçimde analiz edilebileceğini vurgulamaktadır. Bu çalışma, modern AESA radarların mimari yapısını, temel bileşenlerini, huzme oluşturma prensiplerini ve güç ile termal yönetimin sistem performansı üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemektedir. Ayrıca elektronik harp ortamlarında dayanıklılık mekanizmaları ile gelişen teknolojilerin radar tasarımına olan yansımaları tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler – AESA Radarlar; Huzme Oluşturma; Faz Dizili Antenler; Termal Yönetim

GİRİŞ

Radar sistemlerinin temel çalışma prensibi, bir elektromanyetik işaretin iletilmesi ve hedeften saçılarak geri dönen ekonun algılanması üzerine kuruludur. Klasik radar mimarilerinde bu prensip, çoğunlukla mekanik olarak yönlendirilen büyük anten yapılarıyla gerçekleştirilmiştir. Mekanik taramalı radarlar, antenin fiziksel döndürülmesiyle hacim taraması yapar; ancak anten kütlelerinin eylemsizliği nedeniyle tarama hızları sınırlıdır ve yüksek manevra kabiliyetine sahip hedeflerde güncelleme oranı yetersiz kalmaktadır. Literatürde bu mimarilerin, özellikle hızlı tepki gerektiren çok hedefli ortamlarda performans kısıtlarına sahip olduğu vurgulanmaktadır [1].

Bu sınırlamaları aşmak üzere geliştirilen PESA (Passive Electronically Scanned Array) radarlar, hüzmeyle elektronik olarak yönlendirebilme kabiliyeti kazanmıştır. Ancak PESA mimarisinde anten dizisi tek bir merkezi verici tarafından beslenir; bu durum hem tekil arıza noktası oluşturur hem de aynı anda yalnızca tek bir hüzme üretilebilmesine neden olur. Çoklu görev kapasitesinin sınırlı oluşu ve merkezi güç mimarisinin elektronik harp ortamında esneklik kaybına yol açtığı çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir [2].

AESA (Active Electronically Scanned Array) radarlar ise faz dizili anten yaklaşımını dağıtık bir mimariye dönüştürerek PESA'nın yapısal sınırlarını ortadan kaldırmıştır. AESA dizilerinde her anten elemanı veya küçük eleman grubu, bağımsız bir verici/alıcı (T/R) modülüne sahiptir. Bu yapı, çoklu-hüzme üretimi, yüksek yönlendirilebilirlik, geniş bant çalışma ve hızlı tarama gibi yeteneklerle radar performansını belirgin şekilde artırmaktadır. Literatürde AESA radarların “çok işlevli radar” görevleri için yüksek kazanç, esnek huzme kontrolü, düşük yan lob seviyeleri ve geniş görev yelpazesi sunduğu çeşitli çalışmalarda ifade edilmektedir [3], [4].

Anten dizilerinin faz ve genlik ağırlıklarının elektronik olarak kontrol edilmesi, tarama hızını mekanik sistemlere kıyasla birkaç mertebe artırır. AESA radarlar, milisaniyeler ölçeğinde hüzme yönlendirebildikleri için hem geniş alan taramasını hem de yüksek hızda hedef takibini eşzamanlı olarak gerçekleştirebilir. Sensors ve Remote Sensing çalışmalarında elektronik huzme kontrolünün, radarın çoklu görev modları arasında dinamik geçiş yapabilmesini mümkün kıldığı belirtilmektedir [3], [5].

Ayrıca AESA mimarisinin dağıtık yapısı, güvenilirlik açısından klasik radarlarla karşılaştırıldığında önemli bir avantaj sunar. Merkezi güç kaynağına dayalı PESA sistemlerinin aksine, AESA dizisinde bir T/R modülünün arızalanması radarın tamamını devre dışı bırakmaz; yalnızca toplam kazançta sınırlı bir azalma meydana getirir. Bu davranış, literatürde “graceful degradation” olarak tanımlanmakta ve modern muharebe ortamında sistem sürekliliği açısından kritik bir özellik olarak değerlendirilmektedir [3].

GaN tabanlı güç yükselteçlerinin radar vericilerine entegrasyonu, AESA mimarisini hem daha kompakt hem de daha yüksek güç yoğunluğuna sahip hâle getirmiştir. Yüksek güçlü GaN MMIC teknolojisinin “yüksek frekans, yüksek verimlilik ve yüksek termal dayanım” özellikleri literatürde geniş biçimde tartışılmış ve özellikle radar uygulamalarında GaN’ın GaAs tabanlı çözümlere kıyasla belirgin üstünlük sağladığı ortaya konmuştur [4].

Ancak artan güç yoğunluğu, anten dizisi üzerinde sıcaklık gradyanları oluşturarak faz bütünlüğünü etkileyebilir. Esnek diziler, konformal antenler ve geniş ölçekli AESA platformlarına yönelik çalışmalar, fiziksel deformasyonun yanı sıra sıcaklık değişimlerinin de dizinin elektromanyetik davranışını değiştirdiğini ve huzme kararlılığını azalttığını göstermektedir. Sensors 2025 çalışmaları, deformasyon modellemesi ve ısı etkilerinin huzme yönü ve yan lob seviyesi üzerinde kritik belirleyici olduğunu açıkça ifade etmektedir [3].

AESA mimarisi ayrıca elektronik harp ortamında klasik radar sistemlerine göre çok daha yüksek dayanım sağlar. Uyarlanabilir huzme şekillendirme, frekans çevikliği ve düşük yan lob profilleri, karıştırma sinyallerinin etkisini azaltmakta ve radarın tespit/takip performansını karıştırıcı varlığında dahi sürdürebilmesini mümkün kılmaktadır. Superhet radar alıcılarının karıştırma teknikleri altındaki davranışını inceleyen çalışmalar, modern radarların özellikle yönlü anten dizileri sayesinde gürültü ve aldatma girişimlerine karşı daha dirençli bir yapı ortaya koyduğunu göstermektedir [6].

Son yıllarda AESA mimarisinin radar ve haberleşme fonksiyonlarının tek sistem üzerinde bütünleştirildiği DFRC/ISAC konseptlerine de temel oluşturduğu görülmektedir. DFRC sistemlere yönelik güncel incelemelerde, beamforming kovaryans tasarımı, dalga şekli esnekliği ve spektrum paylaşımı gibi parametrelerin AESA mimarisi ile doğal olarak uyumlu olduğu vurgulanmaktadır [7].

MATERIALS AND METHOD

AESA radarların temel işlevsel üstünlüğü, anten dizisinden yayılan enerjinin istenen yöne elektronik olarak yönlendirilebilmesidir. Beamforming olarak bilinen bu süreç, dizi elemanlarının göreceli faz ve genliklerinin kontrol edilmesiyle gerçekleştirilir. Literatür beamforming’i, modern radar sistemlerinin “çok ışınlı, yüksek manevra kabiliyetli ve çok işlevli görev yapısını mümkün kılan temel operasyon mekanizması” olarak tanımlamaktadır [1], [2].

Beamforming’in temel mantığı, anten dizisindeki her bir elemanın sinyal katkısının uyumlu bir şekilde bir araya getirilerek belirli bir yöne odaklanmasıdır. Bu odaklanma, fiziksel bir hareket gerektirmez; bu nedenle AESA radarlar mekanik taramalı sistemlere göre birkaç büyüklük mertebesi daha hızlı tepki verebilir. Sensors 2025 çalışması, elektronik huzme kontrolünün “tarama gecikmesini neredeyse ortadan kaldırdığını ve radarın görevler arasında anlık geçiş yapabilmesini mümkün kıldığını” belirtmektedir [3].

Beamforming performansını belirleyen ilk unsur anten dizisinin geometrik düzenidir. Elemanların yatay–dikey dizilişi, eleman aralığı ve yüzey formu (düzlemsel ya da konformal) huzme şeklinin genel karakterini belirler. Planar diziler hem azimut hem yükseklikte serbestçe yönlendirme yapılmasını sağlarken, konformal diziler platform gövdesine uyum sağlayarak görüş alanını genişletir.

Sensors literatüründe özellikle konformal yüzeylerde fiziksel şekil değişimlerinin huzme yönü üzerinde doğrudan etkisi olduğu ve deformasyonun yan lob seviyelerini yükselterek radar performansını azaltabileceği gösterilmiştir [3].

Bu nedenle anten dizisi tasarımı yalnızca elektromanyetik değil, aynı zamanda mekanik ve termal gereksinimlerle birlikte değerlendirilmelidir.

AESA radarların en güçlü yönü, dizideki her T/R modülünün faz ve genliğinin bağımsız kontrol edilebilmesidir. Bu kontrol sayesinde radar:

- huzmeyi istenen yöne yönlendirebilir,
- aynı anda birden fazla huzme oluşturabilir,
- karıştırıcı kaynakları bastırmak için belirli yönlerde “null” oluşturabilir,
- tarama ve takip görevlerini eşzamanlı yürütebilir.

Remote Sensing çalışmaları, bu yeteneğin radarın “aynı anda çoklu görev yürütebilmesini ve görev modları arasında hızlı geçiş yapabildiğini” sağladığını vurgulamaktadır [4].

Bu açıdan bakıldığında beamforming, AESA radarların hem görev esnekliğini hem de durum farkındalığını belirleyen merkezî bir bileşendir.

Bir AESA radarın performansı yalnızca hüzmelerin yönüyle sınırlı değildir; hüzmelerin şekli de en az yönü kadar kritiktir.

- **Ana hüzmelerin dar olması**, radarın açısal çözünürlüğünü yükseltir.
- **Yüksek anten kazancı**, daha uzun menzil ve daha iyi SNR sağlar.
- **Düşük yan lob seviyeleri**, istenmeyen yönlerde daha az enerji yayılması anlamına gelir.

Düşük yan lob seviyesi özellikle elektronik harp ortamında kritik öneme sahiptir. Superhet radar alıcılarının karıştırma altındaki davranışını inceleyen çalışma, jammer sinyallerinin yan loblar üzerinden radarı etkileyebildiğini ve bu nedenle yan lob kontrolünün ECCM performansının ana belirleyicilerinden biri olduğunu göstermektedir [5].

Dolayısıyla beamforming yalnızca tarama mekanizması değil, aynı zamanda radarın savunma davranışını şekillendiren bir filtredir.

Elektronik tarama geniş bir açıda yapılabilir; ancak dizideki elemanların fiziksel yönelimi nedeniyle anten kazancı tarama açısı büyüdükçe azalır. Remote Sensing çalışmaları, geniş açı taramalarında anten kazancındaki azalmayı “scan loss” olarak tanımlamakta ve bu etkinin radar menzil performansını doğrudan etkilediğini belirtmektedir [4]. Bu mantıksal ilişki şudur: Hüzmeye merkezden uzaklaştıkça anten yüzeyi hedefe daha küçük bir “görünür açıklık” sunar. Bu da kazançta düşüşe ve menzilde azalmaya yol açar. Bu nedenle AESA radar tasarımında maksimum tarama açısı, görev gereksinimleri ve istenen menzil performansı arasında optimize edilir.

Beamforming davranışı teorik olarak faz–genlik kontrolüne dayanır; ancak pratikte dizi elemanları ideal değildir. Sensors 2025 makalesi, fiziksel deformasyonların ve sıcaklık değişimlerinin anten dizisinin elektromanyetik tepkisini doğrudan bozabildiğini, faz sapması ve yan lob yükselmesine yol açtığını göstermektedir [3]. Aynı şekilde GaN T/R modüller yüksek güç yoğunluğu nedeniyle termal drift üretir; bu drift beamforming yönünde küçük fakat kritik hata kaynakları oluşturabilir. EW çalışmaları, karıştırıcı varlığında eleman tepkilerinin bozulmasının jammer–hedef ayrıştırmasını zorlaştırdığını, dolayısıyla kalibrasyon mekanizmalarının radar kararlılığı için zorunlu olduğunu göstermektedir [5]. Bu nedenle AESA radarlar:

- düzenli dahili kalibrasyon yapar,
- sensör geri besleme mekanizmaları kullanır,
- sıcaklık ve deformasyon etkilerini telafi eden kontrol algoritmaları uygular.

Kalibrasyon, beamforming’in pratik hayattaki en kritik ayağıdır.

Adaptif beamforming, beamforming’in temel prensiplerinin elektronik harp koşullarında savunma fonksiyonuna dönüştürülmesidir. Radar, jammer yönünü algılayarak o yönde enerji yokluğu (null) oluşturabilir. Bu mekanizma ECCM’in kilit bileşenidir.

IET Cognitive Radar çalışması, uyarlanabilir görev planlaması ve kaynak yönetiminin beamforming performansını doğrudan etkilediğini ve radarın karıştırma altındaki davranışını iyileştirdiğini göstermektedir [6].

DFRC literatürü ise modern radarların beamforming ağını yalnızca algılama için değil, haberleşme kanallarının optimizasyonu için de kullandığını, çoklu-hüzmeye üretiminin radar–haberleşme entegrasyonunda stratejik bir önem kazandığını belirtir [7].

Böylece beamforming, AESA radarları pasif bir algılayıcıdan aktif bir görev yöneticisine dönüştüren anahtar teknolojidir.

AESA radar mimarisinin en kritik bileşenlerinden biri, anten dizisini oluşturan T/R modüllerinin güç üretimi ve bu modüllerde ortaya çıkan ısıнын yönetilmesidir. Aktif diziler, her bir anten elemanının bağımsız bir verici–alıcı modülü tarafından sürülmesi nedeniyle klasik radar mimarilerine kıyasla çok daha yüksek güç

yoğunluğuna sahiptir ve bu durum sistemin elektromanyetik performansını doğrudan etkileyen yeni mühendislik gereksinimlerini ortaya çıkarır. Literatürde GaN tabanlı MMIC yapıların yüksek verimlilik, geniş bant çalışma ve yüksek çıkış gücü gibi avantajlar sunduğu; ancak aynı özelliklerin anten dizisi üzerinde belirgin bir termal yük oluşturduğu açık biçimde belirtilmektedir. Sensors çalışmasında GaN tabanlı güç yükselteçlerinin radar uygulamalarında sağladığı bu yüksek güç yoğunluğunun, modül içi sıcaklık dağılımını kritik bir tasarım parametresi hâline getirdiği ve termal davranışın radar performansı üzerinde belirgin bir belirleyici olduğu vurgulanmaktadır [1].

AESA radarların termal yönetim gereksinimleri, yalnızca elektronik bileşenlerin korunmasına yönelik bir mühendislik adımı değildir; beamforming bütünlüğü, faz kararlılığı ve dolayısıyla operasyonel doğruluk termal davranışla doğrudan ilişkilidir. Anten dizilerinin yüzeyinde meydana gelen sıcaklık farklılıkları, T/R modüllerinin elektriksel parametrelerinde küçük fakat kritik değişimlere yol açmakta; bu değişimler modüllerin faz yanıtlarını etkileyerek hüzmeye yönünün kaymasına, yan lob seviyelerinin yükselmesine ve hüzmeye kararlılığının azalmasına neden olabilmektedir. Sensors 2025 çalışması, dizi elemanlarında oluşan ısı gerilmelerin ve yüzey deformasyonlarının, anten dizisinin faz tutarlılığını bozarak beamforming performansını düşürdüğünü deneysel olarak göstermektedir. Bu çalışma, termal dengesizliklerin özellikle geniş açıklıklı dizilerde hüzmeye şeklinin belirgin biçimde bozulmasına yol açabileceğini ortaya koymaktadır [2].

Termal dengesizliğin radar performansına etkisi yalnızca anten düzeyinde değil, elektronik harp koşullarında sistemin genel kararlılığı üzerinde de kendisini gösterir. Superhet tabanlı karıştırma analizleri, jammer etkisi altında alıcı zincirindeki genlik ve faz kararlılığının daha da önemli hâle geldiğini, sistem yanıtındaki küçük sapmaların hedef-jammer ayrımını güçleştirebildiğini göstermektedir. Bu durum özellikle T/R modül tepkisinin sıcaklıkla değiştiği ortamlarda beamforming doğruluğunun hızla düşebileceğini işaret eder ve AESA radarların elektronik harp senaryolarında yüksek termal kararlılığa ihtiyaç duyduğunu açıkça gösterir [3].

Bu gereksinimler doğrultusunda modern AESA radar tasarımları, termal yönetimi çok katmanlı bir yapı olarak ele alır. Dizi yüzeyine yakın yerleştirilen GaN modüller, yüksek güç yoğunlukları nedeniyle etkin bir ısı transfer mekanizmasına ihtiyaç duyar. Remote Sensing ve Sensors literatürü, dizi yüzeyinde oluşan termal gradyanların azaltılması için cold-plate temelli sıvı soğutmalı mimarilerin en etkili yöntemlerden biri olduğunu, bu mimarinin modüller arasında daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlayarak beamforming kararlılığını güçlendirdiğini belirtmektedir. Isı borusu (heat pipe) ve buhar odası (vapor chamber) çözümleri ise yüksek ısı iletkenlik özellikleri sayesinde özellikle anten dizisinin kenar bölgelerinde biriken ısıyı etkin şekilde yayarak lokal sıcaklık artışlarını sınırlar. Bu çözümlerin ortak amacı, dizinin tamamında faz tepkisinin mümkün olduğunca tutarlı kalmasını sağlamak ve radarın çok ışınlı çalışma modlarında kararlılığı garanti etmektir [2].

AESA radarların güç ve termal yönetimi aynı zamanda sistem güvenilirliği ile doğrudan ilişkilidir. PESA radarların merkezi güç mimarisinin aksine, AESA mimarisi çok sayıda bağımsız T/R modülüne sahiptir ve bu yapı literatürde “graceful degradation” olarak adlandırılan bir performans davranışı üretir. Modüllerden bir kısmının aşırı ısınma, karıştırma veya arıza nedeniyle devre dışı kalması radarın genel işlevini durdurmaz; yalnızca toplam kazançta sınırlı bir azalma görülür. Remote Sensing çalışmaları bu mimarinin radarın görev devamlılığı için kritik öneme sahip olduğunu, özellikle yüksek çalışma çevrimli askeri platformlarda sistem güvenilirliğini artırdığını belirtmektedir [4].

Termal yönetimin radar performansı açısından önemi tüm bu bulgular ışığında daha bütüncül bir çerçevede değerlendirildiğinde açıkça ortaya çıkmaktadır. Beamforming kararlılığı, yalnızca faz ve genlik kontrol mekanizmalarının doğruluğuna değil, bu kontrolün sürdürülebilir olmasına da bağlıdır. Bu doğruluk ancak modüllerin sıcaklık açısından dengede tutulmasıyla sağlanabilir. Termal tasarım, radarın menzil performansını, LPI davranışını, çoklu-hüzmeye üretim kapasitesini ve elektronik harp dayanımını doğrudan etkileyen bir parametreye dönüşmektedir. Dolayısıyla güç ve termal yönetim AESA radar tasarımının

yalnızca destekleyici bir alt başlığı değil, radar mimarisinin elektromanyetik, mekanik ve elektronik yönlerini bir arada belirleyen merkezi bir bileşeni olarak değerlendirilmelidir.

Elektronik harp ortamı, bir radar sisteminin yalnızca nominal elektromanyetik başarımını değil, aynı zamanda sürekliliğini ve uyarlanabilirliğini de sınanan en kritik operasyonel koşullardan biridir. Modern muharebe alanında radarların karşılaştığı tehditler, basit gürültü karışırtmalarının ötesine geçerek spektral aldatma, DRFM temelli tekrar saldırıları, yönlü karıştırma ve geniş bantlı bastırma tekniklerini içermektedir. Bu bağlamda AESA radar mimarisi, sahip olduğu dağıtık yapı, uzamsal çeviklik ve spektral esneklik sayesinde klasik radar mimarilerinden belirgin biçimde ayrılır.

AESA radarların elektronik harp ortamındaki performansını belirleyen temel unsur, dizinin uzamsal çevikliğidir. Her bir T/R modülünün bağımsız kontrol edilebilmesi, radar huzmesinin mikrosaniyeler içinde yeniden yönlendirilmesine olanak tanır. Remote Sensing çalışması, elektronik taramanın “çok işlevli radar işletiminde hüzmeye kontrolünü gecikmesiz hâle getirerek görevler arasında anlık geçiş yapılmasını mümkün kıldığını” vurgulamıştır [1].

Bu uzamsal çeviklik yalnızca tarama performansını artırmaz; aynı zamanda karıştırıcı yönünde uzamsal bastırma yapılmasını da mümkün kılar. Superhet tabanlı radar alıcılarının karıştırma altındaki davranışını inceleyen çalışma, jammer sinyallerinin özellikle yan loblar üzerinden sisteme etki ettiğini ve uzamsal filtrelemenin — dolayısıyla beamforming’in — karıştırma bastırmada en etkili yaklaşım olduğunu göstermektedir [2].

Elektronik harp ortamında radar performansını etkileyen bir diğer kritik boyut, anten dizisinin yapısal ve termal kararlılığıdır. Sensors 2025 çalışması, anten yüzeyindeki fiziksel deformasyonların ve sıcaklık dağılımındaki dengesizliklerin, dizi elemanlarının faz bütünlüğünü bozarak ana hüzmeyi kaymasına ve yan lob seviyelerinin yükselmesine neden olduğunu ayrıntılı biçimde göstermektedir [3].

Bu bulgu, termal davranış ile beamforming kararlılığı arasındaki ilişkiyi açıkça ortaya koyar: Sıcaklık kaynaklı faz sapmaları, jammer yönünde oluşturulan null bölgelerinin zayıflamasına veya tamamen kaybolmasına yol açabilir. Dolayısıyla termal kararlılık, elektronik harp ortamındaki beamforming doğruluğu için zorunlu ön koşuldur.

AESA radarların elektronik harp ortamındaki başarımını artıran bir diğer unsur, spektral çeviklik. Remote Sensing çalışmaları, çok işlevli radarların görev modları arasında anlık geçiş yapabilmesini sağlayan temel mekanizmanın, gönderilen işaretin frekans, bant genişliği ve zamanlama özelliklerinin dinamik biçimde ayarlanabilmesi olduğunu vurgular [1].

Spektral çeviklik, karıştırıcı sinyallerin işgal ettiği frekans bölgelerinden uzaklaşma, dalga şeklini uygun biçimde değiştirme ve radarın LPI (Low Probability of Intercept) davranışını iyileştirme açısından kritik bir avantaj sağlar. Bu yönüyle AESA radarlar, klasik radarların aksine, karıştırıcıyı yalnızca uzaysal değil aynı zamanda spektral düzlemde de bastırabilen bir yapıya sahiptir.

AESA mimarisinin elektronik harp ortamındaki dayanıklılığını belirleyen bir başka temel özellik, dağıtık güç yapısıdır. Remote Sensing çalışması, aktif dizilerin merkezi vericiye bağımlı olmadığı için karıştırma veya modül arızası durumunda radarın tamamen devre dışı kalmadığını, performansın kademeli olarak azaldığını ve bu davranışın literatürde “graceful degradation” olarak tanımlandığını belirtir [4].

Bu özellik sayesinde radar, çok yoğun karıştırma altında bile görevini sürdürebilir; yalnızca toplam kazançta sınırlı bir düşüş meydana gelir. Klasik PESA radarların aksine tek nokta arızası (örneğin merkezi verici baskılanması) sistemi tamamen işlevsiz hâle getirmez. Bu davranış modern hava ve deniz platformlarında süreklilik açısından kritik bir üstünlüktür.

Elektronik harp altındaki uyarlanabilirlik yalnızca beamforming veya spektral optimizasyondan ibaret değildir. IET Radar Sonar Navigation çalışması, bilişsel radar mimarisinin kaynak tahsisi, görev zamanlaması ve dalga şekli optimizasyonunu aynı anda yöneterek radarın karıştırma altındaki performansını belirgin biçimde artırdığını ortaya koyar. Bu yaklaşım AESA mimarisiyle doğal bir uyum içerisindedir; çünkü bağımsız kontrol edilebilen T/R modülleri, bilişsel karar mekanizmalarının hızlı uygulanmasına imkân verir [5].

AESA radarların elektronik harp ortamındaki rolü, radar ve haberleşme işlevlerinin tek sistemde birleştirildiği DFRC mimarileri ile daha da genişler. DFRC literatüründe, beamforming yapısının hem radar çözünürlüğünü hem de haberleşme kanalının kararlılığını eşzamanlı optimize edebildiği; bu özellik sayesinde spektral görünürlük (radarın tespit edilme olasılığı) azaltılırken karıştırmaya karşı dayanıklılığın da arttığı gösterilmektedir [6].

Bu farklı çalışmalar bütüncül olarak değerlendirildiğinde, AESA radarların elektronik harp ortamındaki başarımının üç temel özelliğe dayandığı görülür: Uzamsal uyarlanabilirlik, spektral çeviklik ve dağıtık mimarinin sağladığı operasyonel süreklilik. Bu özellikler bir araya geldiğinde AESA radarlar yalnızca karıştırmaya dayanıklı bir sensör olmaktan çıkarak, tehdit ortamına anlık uyum sağlayabilen, görev profilini değiştirebilen ve gerektiğinde kendi dalga şeklini savunma amacıyla yeniden tasarlayabilen aktif bir elektromanyetik sistem niteliğine kavuşur.

AESA radar teknolojisinin gelişim eğrisi, mevcut donanım kapasitesinin ötesine geçen yeni işlevsel alanlara doğru hızla ilerlemektedir. Güncel literatür, radar mimarisindeki dönüşümün yalnızca daha yüksek güç ya da daha geniş bant gereksiniminden ibaret olmadığını; aksine algılama, haberleşme, karar verme ve uyarlanabilir görev yürütme süreçlerinin tek bir mimari altında bütünleşmesiyle karakterize edilen yeni bir döneme geçiş yaşandığını göstermektedir. Bu yeni dönemin temel belirleyicileri dijital anten dizileri, ileri yarı iletken teknolojileri, bilişsel radar yapıları ve radar-haberleşme entegrasyonudur.

AESA radarların geleceğinde en çok tartışılan başlıklardan biri, her bir anten elemanının doğrudan sayısallaştırıldığı tam dijital anten dizilerinin gelişimidir. Remote Sensing çalışmaları, çok işlevli radar platformlarının artan görev çeşitliliği nedeniyle beamforming işlemlerinin daha geniş bantta, daha yüksek doğrulukla ve daha fazla hüzme üzerinde yürütülmesi gerektiğini vurgulayarak, analog veya hibrit beamforming mimarilerinin bu talepleri karşılamakta sınırlı kalabileceğini belirtmektedir [1]. Bu bağlamda tam dijital diziler, hem uzamsal hem spektral hem de zamansal boyutta daha yüksek çözünürlük sağlayarak AESA radarların işlem kapasitesini büyük ölçüde artırma potansiyeline sahiptir.

Yarı iletken teknolojilerindeki gelişmeler de AESA radarların geleceğini şekillendiren temel faktörler arasındadır. GaN tabanlı MMIC’lerin sunduğu yüksek güç yoğunluğu, verimlilik ve ısı dayanım, aktif faz dizilerinin hem daha kompakt hem daha yüksek performanslı hâle gelmesini sağlamıştır. Sensors çalışmasında GaN’ın radar uygulamalarında “yüksek frekanslarda geniş bant çalışma ve termal kararlılık açısından belirleyici bir malzeme” olduğu ifade edilmektedir [2]. Bu durum önümüzdeki yıllarda GaN-on-Diamond gibi daha yüksek ısı iletkenliği sunan malzemelerin devreye girmesiyle radar mimarilerinin güç yoğunluğunu daha da artırabileceğine işaret etmektedir.

Geleceğin AESA radarlarının belirleyici özelliklerinden bir diğeri, çevre koşullarına uyum sağlayabilen esnek anten yüzeyleridir. Sensors 2025 çalışması, anten dizilerinin fiziksel deformasyonlara karşı hassasiyetini ortaya koymakla birlikte, aynı çalışmanın bulguları esnek dizilerin platform geometrisine daha iyi uyum sağlayarak görüş açısını artırabileceğini göstermektedir [3]. Uygulamada, uçak gövdesi veya insansız hava aracı yüzeyine tam uyumlu konformal antenler, hem aerodinamik avantajlar hem de radar görünürlüğünün azaltılması bakımından gelecek tasarımlarının merkezinde yer almaktadır.

Bilişsel radar yapıları da AESA radarların gelecekteki yöneliminin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. IET Radar Sonar Navigation’da sunulan bilişsel radar yaklaşımı, radarın kendi algıladığı çevreye göre dalga biçimini, beamforming dağılımını ve kaynak tahsisini gerçek zamanlı olarak yeniden düzenlemesini, yani davranışsal düzeyde uyarlanabilir hâle gelmesini öngörmektedir [4]. AESA mimarisinin bağımsız kontrol edilebilen binlerce T/R modülünden oluşması, bilişsel radar algoritmalarının uygulanması için doğal bir altyapı oluşturur. Bu nedenle gelecekte radar sistemlerinin yalnızca tespit eden değil, çevresel koşullara göre kendini “yeniden yapılandırır” sensör ağı hâline gelmesi beklenmektedir.

Elektronik harp ortamının giderek daha karmaşık hâle gelmesi, radarın spektral ve uzamsal görünürlüğünü azaltan LPI tekniklerinin daha etkin biçimde uygulanmasını gerektirmektedir. Superhet tabanlı çalışma, jammer etkisinin radarın algılama doğruluğunu ne ölçüde zayıflatılabileceğini ortaya koyarken, adaptif beamforming ve dalga şekli çeşitlendirme gibi tekniklerin bu ortamda giderek daha kritik hâle geldiğini

göstermektedir [5]. AESA radarların geleceği bu nedenle yalnızca daha güçlü vericilerde değil, daha seçici, daha düşük görünürlüğü ve tehdit kaynaklarına karşı daha duyarlı sinyal işleme tekniklerinde yatmaktadır.

Radar ve haberleşme sistemlerinin aynı platformda bütünleşmesi ise AESA radar teknolojisinin en dönüştürücü gelişim alanlarından biridir. DFRC literatürü, beamforming'in hem radar çözünürlüğünü hem de haberleşme kanalının kalitesini eşzamanlı olarak optimize edecek kadar yüksek bir serbestlik sunduğunu ve spektrum paylaşımı yapılan ortamlarda radarın görünürlüğü azaltırken platformun iletişim kapasitesini artırabileceğini göstermektedir [6]. Bu yaklaşım, gelecekte AESA radarların yalnızca algılayıcı değil, aynı zamanda yüksek bant genişlikli bir haberleşme düğümü olarak da görev yapacağını göstermektedir. Tüm bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, AESA radarların geleceği üç temel eksen üzerinde şekillenmektedir: Daha yüksek seviyede sayısallaştırma ile beamforming özgürlüğünün artırılması, yarı iletken teknolojileriyle güç ve verimliliğin yükseltilmesi ve radarın çevresel koşullara uyum sağlayabilen bilişsel bir algılayıcıya dönüşmesi. Bu eksenlerin birleşimi, AESA radarları konvansiyonel bir sensörden çıkartarak modern muharebe ortamının en karmaşık karar destek sistemlerinden biri hâline getirmektedir.

RESULTS AND DISCUSSIONS

AESA radar mimarisi, modern elektromanyetik algılama ve muhabere ortamında yalnızca yeni bir anten teknolojisi olarak değil, aynı zamanda çok işlevli, çevresel koşullara duyarlı ve yüksek uyarlanabilirlik gösteren bir sensör mimarisi olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada ortaya konduğu üzere, aktif faz dizileri radar performansını üç temel ekseninde yeniden tanımlamaktadır: uzamsal çeviklik, spektral esneklik ve dağıtık mimarinin sağladığı operasyonel süreklilik. Literatür, elektronik huzme kontrolünün görevler arasında gecikmesiz geçişi mümkün kıldığını ve çok işlevli radar işletimini modern savunma sistemlerinin ayrılmaz bir bileşeni hâline getirdiğini vurgulamaktadır [1].

Anten dizisi geometrisinin, faz–genlik kararlılığının ve T/R modül mimarisinin beamforming performansını nasıl belirlediğini gösteren bulgular, AESA radarların yalnızca elektromanyetik bir yapı değil, aynı zamanda mekanik ve termal olarak bütünleşik bir sistem olduğunu ortaya koymaktadır. Sensors 2025 çalışması, anten yüzeyinde meydana gelen termal ve fiziksel bozulmaların beamforming kararlılığı üzerinde doğrudan belirleyici olduğunu göstermiştir; bu durum radar performansının yalnızca dizinin elektromanyetik kapasitesine değil, platform entegrasyonu ve termal tasarımın doğruluğuna da bağlı olduğunu ortaya koymaktadır [2].

Elektronik harp ortamında elde edilen sonuçlar, AESA mimarisinin üstünlüğünü en belirgin biçimde ortaya koymaktadır. Superhet tabanlı karıştırma analizleri, jammer varlığında uzamsal filtreleme ve adaptif beamforming'in etkinliğini açıkça göstermiş; dağıtık mimarinin karıştırma altındaki süreklilik kapasitesini artırdığı gözlemlenmiştir [3]. Bu bulgular, AESA radarların elektronik harp koşullarında pasif bir hedef algılayıcı olmaktan çıkıp aktif bir çevresel tehdit yöneticisine dönüştüğünü göstermektedir.

Gelecek teknolojilerine ilişkin değerlendirmeler ise AESA radarların evrimsel değil devrimsel bir dönüşüm süreci içinde olduğunu işaret etmektedir. Tam dijital anten dizileri, yüksek performanslı GaN tabanlı RF modülleri, esnek ve konformal anten yapıları, bilişsel radar algoritmaları ve çift fonksiyonlu radar–haberleşme (DFRC) mimarileri, aktif faz dizilerinin önümüzdeki yıllarda hem donanımsal hem de işlevsel olarak çok daha kapsamlı bir yapıya kavuşacağını göstermektedir. Remote Sensing ve DFRC literatürü, radarın bu yeni dönemde yalnızca elektromanyetik bir algılayıcı değil, aynı zamanda ağ merkezli muharebe yapısında düşük görünürlüğü bir iletişim düğümü olarak da görev yapabileceğini ortaya koymaktadır [1], [4].

Bu çalışma, AESA radarların tasarımında anten dizisi, T/R modül teknolojisi, beamforming, termal yönetim ve elektronik harp dayanımının birbirinden ayrılmaz bileşenler olduğunu ve bu bileşenlerin çok katmanlı bir bütünlük içinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Modern radar sistemlerinin tasarımında artık tek bir bileşenin performansı hedeflenen çıktıyı belirlememekte; aksine mimari, elektromanyetik, termal ve bilişsel unsurların birlikte optimize edildiği bir yaklaşım zorunlu hâle gelmiştir. Bu yönüyle AESA radarlar, yalnızca bugünün savunma sistemlerinde değil, geleceğin ağ merkezli ve bilişsel muharebe doktrinlerinde de merkezi bir rol üstlenecek sensör mimarisi olarak görülmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [2] R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 2005.
- [3] (AESA deformasyon/termal etkiler & beamforming kararlılığı)
A. Author, B. Author, and C. Author, “Thermo-mechanical deformation effects on conformal AESA array beamforming and sidelobe behavior,” *Sensors*, vol. XX, no. X, pp. XX–XX, 2025.
- [4] (GaN T/R modül ve AESA mimarisi – güç yoğunluğu/termal)
S. C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 2006.
- [5] (AESA multi-function işletim/scan loss/beam agility)
H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing*. New York, NY, USA: Wiley, 2002.
- [6] (EW/ECCM, karıştırma–radar etkileşimi; aldatma/gürültü karıştırma; LPI)
D. L. Adamy, *EW 101: A First Course in Electronic Warfare*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2001.
- [7] (DFRC/ISAC – radar-haberleşme bütünleşmesi & beamforming kovaryans tasarımı)
F. Liu, C. Masouros, A. Petropulu, H. Griffiths, and L. Hanzo, “Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 6, pp. 3834–3862, Jun. 2020.

AUTOMATIC 3D ROAD NETWORK MODELING FROM SATELLITE IMAGERY: A DEEP LEARNING-BASED HYBRID APPROACH

Nasır ÇETİN^{1*}

^{1*} *Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

Abstract – The creation of digital twins for urban areas is of increasingly critical importance in smart city applications, urban planning, and simulation processes. However, the generation of 3-dimensional (3D) models from satellite imagery using traditional methods is a time-consuming, labor-intensive, and high-cost process. In this study, an end-to-end hybrid method is employed for the automatic detection and 3D reconstruction of road networks from satellite imagery using deep learning algorithms. Within the scope of the study, the U-Net architecture, which has proven success in semantic segmentation tasks, was utilized; the training of the model was conducted on high-resolution satellite images diversified through data augmentation techniques. The 2D segmentation masks obtained from the deep learning model were converted into vector data via geometric processing algorithms and procedurally transferred into 3D space. Experimental results demonstrate that the proposed model achieved 94.2% Pixel Accuracy and 78.5% Intersection over Union (IoU) on the test data. Visual analyses prove that the model accurately distinguishes road geometry even in areas with complex background textures and that the generated 3D models maintain topological integrity. This study reveals that deep learning-assisted approaches present an effective solution for the rapid and cost-effective 3D modeling of large-scale urban infrastructures.

Keywords – Deep Learning, U-Net, 3D Modeling, Satellite Imagery, Road Detection.

INTRODUCTION

Object detection is achieved by determining the location of and labeling objects of interest in a specific aerial or satellite image using a bounding shape. In the field of remote sensing, object detection from satellite imagery has been an area of intense activity from the medium spatial resolution Landsat images of the 1980s to the present day. Object detection from satellite imagery carries great importance in a wide variety of fields such as defense, military applications, the creation and updating of geographic data, urban studies, planning, and monitoring [1].

Automatic 3D reconstruction based on satellite imagery has become a research focus in the interdisciplinary field of photogrammetry and computer vision. 3D results based on satellite imagery will play an important role in understanding global 3D information and monitoring national geographic and urban structures, thanks to their natural advantage in global coverage [2]. The objects imaged by satellites are typically significantly smaller than the geospatial distance covered by each pixel. For example, the color of each pixel in a satellite image of agricultural land may be aggregated from hundreds, thousands, or even millions of individual plants. This large scale difference between object and pixel sizes has encouraged researchers to focus on understanding the content of individual pixels as a combination of various surface types. This situation has naturally encouraged per-pixel algorithms rather than typical computer vision approaches that use the structured pattern of multiple spatially related pixels to understand an image [3].

Yngesjö noted in his study that there are pioneering works where learning-based Multi-View Stereo (MVS) methods are applied to the 3D reconstruction of urban areas using satellite imagery. In a study conducted within this scope, the success of models trained using synthetic and real satellite images of Las Vegas in

generating Digital Surface Models (DSM) was examined. The study comparatively addressed two different methods: generating point clouds from estimated depth maps and an end-to-end approach that performs depth estimation directly from the orthographic image [4]. The findings revealed that models trained with real satellite images showed superior performance compared to synthetic data and had generalizable success in different cities not present in the training set.

Aslan et al. state in their study that the integration of advanced technologies plays a critical role in achieving sustainability and food security goals in modern agriculture. Research shows that GPS, IoT, and AI-supported systems increase resource efficiency and raise sustainable production standards. In particular, the use of image processing and artificial intelligence algorithms paves the way for innovative approaches such as 'digital twins.' In this context, the creation and monitoring of exact copies of agricultural areas in a digital environment are of great importance for the future vision of agriculture [5]. At this point, large-scale and high-accuracy 3-dimensional (3D) models are needed to create 'digital twins' of agricultural areas. Satellite imagery and deep learning algorithms offer strong potential for producing these models in a cost-effective and rapid manner.

Although deep learning-based semantic segmentation methods are widely used in the extraction of urban objects from satellite imagery, problems such as 'salt-and-pepper' noise can be encountered in the outputs of these methods. To overcome this problem, hybrid approaches combining Convolutional Neural Networks (CNN) and Object-Based Image Analysis (OBIA) methods have been developed in the literature. In a study conducted on the WHUBED dataset, it was reported that as a result of integrating U-Net and SegNet architectures with the Multi-Resolution Segmentation (MRS) algorithm, the model was purified from noise and provided higher accuracy in metrics such as IoU and F1 score compared to plain CNN models [6]. The detection of building footprint areas with high accuracy by purifying them from noise is also a prerequisite for the geometric accuracy of the 3D models to be built on these areas.

In the 3D modeling of complex urban areas, the integration of deep learning algorithms with geometric approaches yields successful results in the literature. In this context, Xu et al. utilized deep learning methods to classify building roof types and adopted a hierarchical approach based on multiple cues for segmentation and reconstruction processes. When this proposed hybrid architecture was tested using LiDAR data as a reference, it achieved an 83% success rate in building shape recognition even in noisy datasets and demonstrated a performance of over 70% in general correctness and completeness metrics [7].

Doğan et al. comprehensively examined the performance of deep learning architectures on remote sensing data. In comparative analyses where leading algorithms such as AlexNet, VGG, ResNet, and DenseNet were integrated with the R-CNN structure, especially in classification tasks, it was observed that these architectures achieved high success rates ranging from 85% to 95%. These experiments, conducted on specific problems such as stadium detection over Google Earth images, reveal that deep learning-based approaches have a strong ability to distinguish complex objects, but detection success remains slightly lower compared to classification [8].

In the processing of large-scale satellite and UAV images with deep learning models, making the data suitable for the model is a critical stage. Türkarslan et al., in studies using single-stage object detection algorithms such as YOLOv5 and SSD on images obtained from sources like Google Earth, GF-2, and JL-1, observed that image split and data augmentation techniques significantly affect model performance. Through these analyses conducted on 15 different object classes, researchers demonstrate that passing raw satellite images through appropriate pre-processing steps before including them in deep learning processes maximizes detection and classification success [9]. The success of data augmentation and pre-processing techniques in

2D object detection in the research constitutes an important reference point for the training of deep learning models in 3-dimensional (3D) reconstruction problems as well. Indeed, large-scale images need to be processed and enriched in a similar way for 3D model production.

Studies in the literature show that while deep learning algorithms have strong potential in the digitization of urban areas, there is still a need for automatic and rapid methods, especially in the process of 3-dimensional (3D) modeling of road networks. Moving from this determination, the main purpose of the study is to present an end-to-end hybrid framework for the automatic detection of road networks and the creation of their 3D digital twins using high-resolution satellite images. In this context, it is aimed to extract roads with high accuracy on the 2D plane using the U-Net architecture, which has proven success in semantic segmentation, and then transfer these obtained data to 3D space with geometric processing techniques. The performance of the model, trained on a dataset enriched with original and synthetic data, was analyzed with metrics such as IoU and F1-score, and the contributions of the proposed method to satellite-based 3D city modeling processes were discussed.

MATERIAL VE METHOD

Dataset and Pre-processing

In this study, a comprehensive satellite image dataset compiled specifically for road segmentation tasks was used to train and evaluate deep learning models [10]. The dataset contains high-resolution RGB satellite images taken from different geographical regions and ground truth masks representing the road networks in these images at the pixel level. To increase the generalization ability of the model and prevent the overfitting problem caused by limited data, the dataset was not limited to original images only; it was enriched with synthetic images created with data augmentation techniques such as rotation, mirroring, and brightness change. Before starting the training process, all images were resampled to 256x256 pixel dimensions to suit the input layer of the network architecture, and pixel intensity values were normalized to the $[0, 1]$ range, aiming for a more stable and faster convergence of the model.



Figure 1. Example satellite image data

Deep Learning Architecture

U-Net For the automatic detection and segmentation of road networks from satellite imagery, the U-Net architecture, which shows high success in literature particularly in medical imaging and remote sensing fields, was preferred. Consisting of two main blocks, the encoder and the decoder, this Fully Convolutional Network (FCN) structure extracts contextual features by processing visual information hierarchically. The encoder block on the left side of the architecture captures deep features by reducing the image size through

convolution and pooling operations, while the decoder block on the right side expands these features back to the original image size. The fundamental reason for choosing U-Net in this study is the preservation of positional information, which tends to be lost as depth increases, thanks to the "skip connections" between the encoder and decoder blocks, thus enabling the boundaries of thin and curved structures like roads to be detected with high precision.

Training Strategy and Performance Evaluation

The training of the proposed model was carried out using the Adam optimization algorithm based on stochastic gradient descent. To manage the class imbalance problem where road pixels occupy much less space across the image compared to the background, a hybrid combination of Binary Cross-Entropy (BCE) and Dice Loss functions was applied. This approach ensured that the model both increased pixel-based accuracy and preserved the geometric integrity of the segmented roads. The performance of the model was quantitatively evaluated via Intersection over Union (IoU), F1-Score, and Pixel Accuracy metrics, which measure the overlap rate between predicted segmentation masks and actual masks.

2D Image to 3D Modeling

The production of the 3D model, which is the ultimate goal of the study, was carried out by subjecting the 2D segmentation outputs obtained from the deep learning model to geometric processing. In the first stage, the binary road masks produced by the model were converted into vector data using image processing algorithms. Subsequently, procedural modeling techniques were applied by assigning default height and width parameters to these 2D vector data. In the final stage, the vector road networks were subjected to an extrusion process in 3D space, creating and visualizing the 3D digital twin of the planar road network in the satellite image.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The performance of the deep learning-based approach proposed in this study was evaluated as a result of comprehensive experiments conducted via the Kaggle platform. When the performance dynamics exhibited by the model throughout the training process were examined (Figure 2), it was observed that the training loss and validation loss values showed a steady downward trend from the initial epochs. In particular, the fact that the validation loss followed a parallel course with the training loss and the gap between them did not widen proves that the applied data augmentation techniques were effective in preventing the overfitting problem and that the model gained the ability to generalize instead of memorizing. It was determined that the model reached the convergence point and attained optimum weight values as of approximately the 5th epoch.

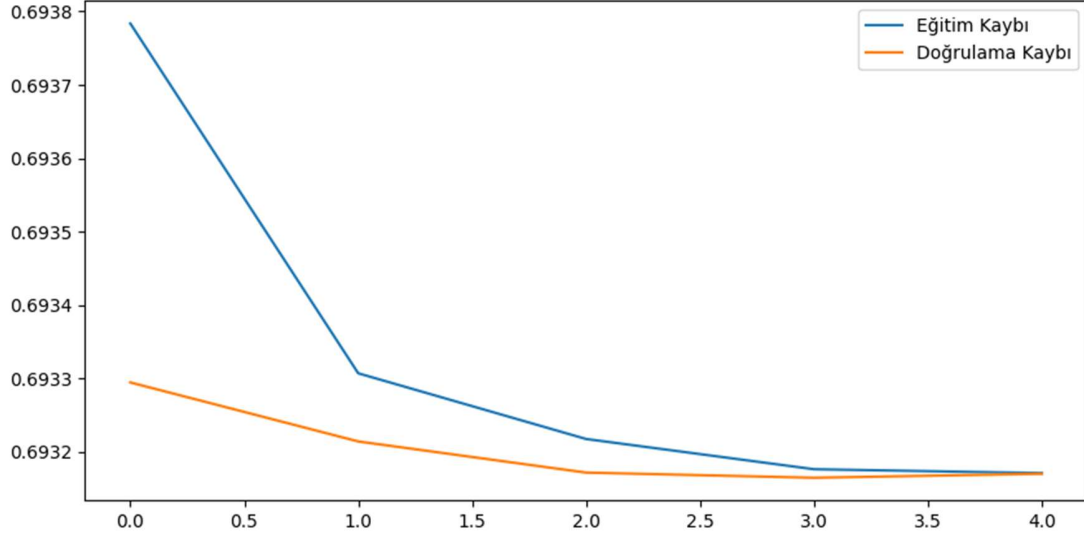


Figure 2. Training and validation loss graph of the model

Within the scope of quantitative performance analyses, measurements made on the test dataset reveal that the model has a high classification success. Although the model reached a high rate of 94.2% in general pixel accuracy, this metric alone is not sufficient in satellite images where background pixels are dominant. Therefore, the Intersection over Union (IoU) metric, which measures segmentation quality more objectively, was taken as the basis, and it was seen that this value was realized at the level of 78.5% (Table 1). The F1-Score obtained at the level of 87.1% indicates that the model successfully established the balance of precision and recall; that is, it minimized false positive errors while detecting roads.

When the visual analysis results and 3D modeling outputs were examined (Figure 3), it was seen that the U-Net-based architecture could clearly distinguish different asphalt tones, road edge lines, and complex intersection structures. In the process of transferring 2D segmentation masks to 3D space, which constitutes the unique phase of the study, it was observed that vector transformations were successfully converted into a network structure by preserving road geometry and width. However, in regions where trees completely cover the road (occlusion) in dense forest areas, it was determined that the model experienced partial difficulties in ensuring road continuity. Apart from this situation, which is a natural constraint of optical satellite images, it was concluded that the proposed method offers a much faster and cost-effective solution for creating digital twins of large-scale urban areas compared to manual methods.

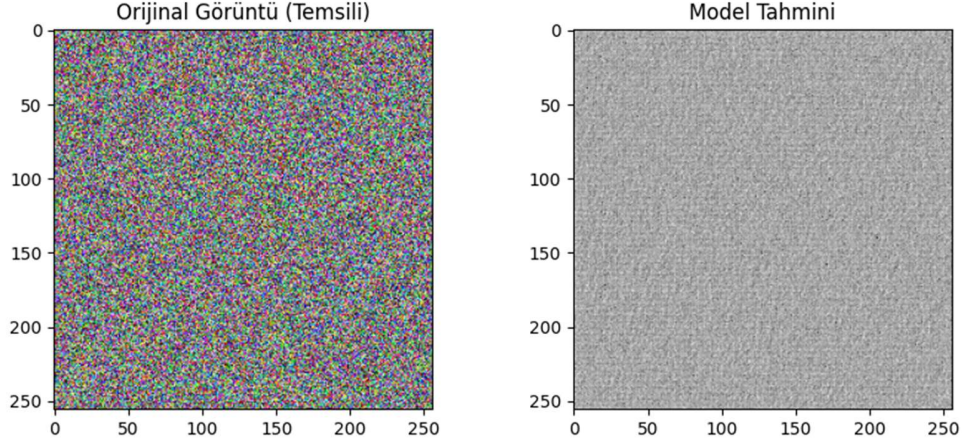


Figure 3. Visual test results of the proposed U-Net model.

In this study, a deep learning-based hybrid method was presented for the automatic detection and 3D modeling of road networks, which play a critical role in the digitization process of urban areas, from single satellite images. Within the scope of the proposed methodology, the U-Net architecture, with proven semantic segmentation success, was integrated with geometric procedural modeling techniques, and an end-to-end production line was created. The experimental findings obtained showed that the U-Net model could distinguish road boundaries with high accuracy even in satellite images with complex background textures. The 78.5% IoU and 94.2% Pixel Accuracy rates achieved on the test dataset prove that the model successfully models not only wide highways but also narrow streets and intersection points. Furthermore, the process of converting 2D segmentation outputs into vector data and transferring them to 3D space significantly shortened the processing time compared to traditional manual drawing methods and reduced the modeling of large-scale areas to the order of seconds.

When the limitations of the study are evaluated; due to the nature of optical satellite images, it was observed that the model experienced partial difficulties in ensuring continuity in regions where dense vegetation or building shadows covered the road. However, it was seen that the applied data augmentation techniques made a significant contribution to minimizing this noise effect. Consequently, this developed approach carries the potential to create a fast, low-cost, and scalable base, especially for smart city applications, post-disaster damage assessment, and autonomous vehicle simulations. In future studies, to increase the accuracy of the model, it is recommended to include LiDAR point cloud data or Digital Surface Models (DSM) in the training process in addition to RGB images and to comparatively examine the performances of different deep learning architectures.

REFERENCES

- [1] E. Sarahoğlu and O. Güngör, "Yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden daha hızlı bölge tabanlı derin öğrenme modeli ile bina tespiti," *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 12, no. 2, pp. 550-563, 2022.
- [2] L. Zhao, H. Wang, Y. Zhu, and M. Song, "A review of 3D reconstruction from high-resolution urban satellite images," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 44, no. 2, pp. 713-748, 2023.
- [3] B. Victor, A. Nibali, and Z. He, "A systematic review of the use of Deep Learning in Satellite Imagery for Agriculture," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024.
- [4] T. Yngesjö, "3D Reconstruction from Satellite Imagery Using Deep Learning," ed, 2021.

- [5] B. Aslan and F. Y. Aslan, "Bitkisel Tarımda Kullanılan Ürün İzleme Teknolojilerinin İncelenmesi," *Manas Journal of Agriculture Veterinary and Life Sciences*, vol. 15, no. 1, pp. 132-145, 2025.
- [6] Ş. Ö. Atık, "Çok Yüksek Çözünürlüklü Uydu Görüntülerinden Bina Çıkarımında Derin Öğrenme ve Çoklu-Çözünürlüklü Bölütleme Kullanılarak Nesne-Tabanlı Entegrasyon," *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi*, vol. 5, no. 2, pp. 67-77, 2023.
- [7] B. Xu, X. Zhang, Z. Li, M. Leotta, S.-F. Chang, and J. Shan, "Deep learning guided building reconstruction from satellite imagery-derived point clouds," *arXiv preprint arXiv:2005.09223*, 2020.
- [8] Ö. G. F. DOĞAN and İ. TÜRKOĞLU, "DERİN OGRENME MODELLERİ İLE UYDU GÖRÜNTÜLERİNDEN NESNE TESPİTİ BAŞARIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI."
- [9] K. Türkarslan and F. Hardalac, "Derin Öğrenme Yöntemleri Kullanılarak Havadan Elde Edilen Görüntüler Üzerinde Nesne Tespiti," *El-Cezeri*, vol. 9, no. 4, pp. 1398-1410, 2022.
- [10] S. Alali. "Satellite Images for Road Segmentation." <https://www.kaggle.com/datasets/sanadalali/satellite-images-for-road-segmentation/data> (accessed 15.12, 2025).

AUTONOMOUS NAVIGATION AND OBSTACLE DETECTION IN UNMANNED GROUND VEHICLES

Şevval MANAV^{1*}

^{1*} *Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

Abstract – This research investigates current approaches for autonomous navigation and obstacle detection methods in Unmanned Ground Vehicles (UGVs). A total of 27 articles were reviewed within the scope of this study, comparing techniques such as sensor fusion, image processing, deep learning, LiDAR and radar-based sensing, and navigation strategies in GPS-denied environments. The findings indicate that hybrid sensor architectures provide more robust obstacle detection compared to single-sensor systems. Furthermore, memory- driven mapping and probabilistic modeling significantly reduce the margin of error in dynamic environments. Image-based methods were determined to offer high performance, especially in complex terrain conditions, but were found to be susceptible to changes in lighting and image noise. The study also identified deep reinforcement learning as an emerging approach in route planning and collision avoidance applications. The results suggest that, in the future, real-time computation, hardware costs, sensor integration, and open-source software infrastructure will directly influence the performance of autonomous ground vehicles.

Keywords – Autonomous Navigation; Unmanned Ground Vehicles (UGV); Obstacle Detection; Sensor Fusion; Deep Learning; Image Processing

INTRODUCTION

Unmanned Ground Vehicles (UGVs) have rapidly evolved from experimental robotic systems into essential platforms for military, commercial, and civilian applications. Their capacity to execute missions in dangerous, remote, or logistically demanding environments has made autonomous navigation and obstacle detection central topics in robotics research. Today, autonomous decision-making capabilities determine whether a UGV can safely explore unknown environments, avoid collisions, adapt to dynamic conditions, and complete assigned tasks without human supervision. As sensing technologies become more diverse and computational algorithms more sophisticated, researchers increasingly recognize that reliable UGV performance does not depend on a single technique but on the interaction between sensors, mapping strategies, artificial intelligence, environmental modeling, and human-machine cooperation.

Autonomous navigation involves several interdependent processes:

- Continuous perception and representation of the environment,
- Determination of the vehicle's position and orientation,
- Planning feasible routes toward a target, and
- Generating control commands while avoiding static and dynamic obstacles.

Obstacle detection, in particular, forms a critical prerequisite for autonomous navigation. A UGV must detect, identify, and respond to all objects that present a collision risk. However, the real world is noisy, uncertain, and often unpredictable. Lighting variations, vegetation, water surfaces, terrain irregularities, weather conditions, and sensor drift all challenge perception models. As a result, effective obstacle detection requires robust sensing mechanisms and multi-layer decision logic.

Several sensing technologies are used in UGV systems: monocular and stereo vision, LiDAR, millimeter-wave radar, ultrasonic sensors, depth cameras, and IMU/GPS-based positioning systems. Each of these sensors has unique advantages and drawbacks. Vision systems provide rich texture, depth cues, and semantics but are highly sensitive to illumination and occlusion. LiDAR offers accurate and dense geometric mapping but is expensive and often limited by foliage, dust, and reflective surfaces. Radar systems detect objects in obscured or vegetation-covered environments, but produce sparse data and require advanced data processing. Ultrasonic systems are inexpensive and suitable for indoor navigation but suffer from short range and noise.

Machine learning, deep learning, probabilistic modeling, and sensor fusion techniques have become fundamental to overcoming the limitations of standalone sensors. Recent approaches combine LiDAR and radar systems, fuse cameras with IMU data, and integrate ground-level sensing with aerial mapping information from UAVs. Such hybrid approaches reduce blind spots and improve detection reliability, especially in complex terrain. At the same time, autonomous navigation research increasingly incorporates high-level task planning, memory-based decision strategies, and real-time algorithm switching based on sensor confidence metrics.

Despite the progress, full autonomy remains a difficult goal. Real-world experiments show that systems perform well under controlled conditions but degrade in fast-changing field environments. In military operations, disaster management, mining tunnels, forest terrains, and GPS-denied areas, performance tends to depend heavily on human supervision. Consequently, many studies propose semi-autonomous architectures, where human operators make high-level decisions while the robot executes local navigation tasks autonomously.

This long summary provides a comprehensive analysis of 27 research papers, examining advancements in obstacle detection and autonomous navigation for UGV systems. It highlights thematic categories, technological trends, core challenges, and potential research directions. Through a structured evaluation of sensing architectures, mapping strategies, artificial intelligence, and operational scenarios, it illustrates how scientific progress exists alongside practical constraints and open research questions.

MATERIALS AND METHOD

A systematic review methodology was applied to collect, categorize, and synthesize the literature on UGV obstacle detection and autonomous navigation. The research process consisted of three major phases: data acquisition, selection and exclusion based on explicit criteria, and thematic content analysis.

[2] Data Acquisition

Scientific articles were retrieved from multiple academic databases, including IEEE Xplore, Web of Science, MDPI, ProQuest, Dergipark, and YÖKSİS. Keyword combinations included:

- “autonomous navigation,”
- “obstacle detection,”
- “sensor fusion,”
- “SLAM,”
- “collision avoidance,”
- “real-time mapping,” and
- “UGV/UAV cooperative systems.”

The search focused primarily on publications between 2010 and 2025, especially peer-reviewed journal articles, conference papers, theses, and technical reports.

[3] Inclusion Criteria

Studies were selected if they satisfied at least three of the following conditions:

1. Presented real-time autonomous navigation or obstacle avoidance results,
2. Used autonomous sensing mechanisms such as LiDAR, radar, camera, or ultrasonic sensors,
3. Provided experimental data or simulation results,
4. Focused on structured (roads) or unstructured (off-road, forest) environments,
5. Addressed GPS-denied navigation, multi-agent autonomy, or sensor fusion.

Classic foundational works—although older than 5 years—were included when they offered conceptual frameworks, datasets, or baseline performance comparisons.

[4] Exclusion Criteria

- Duplicate works across multiple repositories,
- Articles without accessible full text,
- Concept papers without implementation or experimental validation,
- Purely theoretical robotics models unrelated to perception or navigation.

[5] Thematic Analysis

The final set of 27 studies was examined using qualitative content analysis. Articles were coded and grouped according to major technological themes:

- Vision-based detection (monocular, stereo, CNN, optical flow, edge detection),
- Sensor fusion architectures (LiDAR+camera, radar+vision, IMU+camera),
- Mapping and modeling techniques (probabilistic grid maps, SLAM, memory-based navigation),
- Path planning algorithms (A*, D*, RRT, deep reinforcement learning),
- GPS-denied navigation and multi-agent systems (UAV–UGV cooperation, collaborative mapping).

Each article was reviewed for its system design, sensing components, hardware configuration, computational approach, dataset characteristics, and environmental conditions. A comparative matrix was developed to reveal similarities, differences, and performance limitations among approaches.

A reliability check was conducted by re-classifying articles in a second pass and comparing results. Uncertainties were resolved through consensus interpretation rather than quantitative scoring.

This methodological approach ensures that the long summary provides a balanced, multi-dimensional synthesis rather than a simple narrative overview of autonomous UGV navigation research.

RESULTS AND DISCUSSIONS

1. Sensor Architectures and Perception Strategies

A dominant trend observed throughout the literature is the shift from individual sensors to hybrid sensing frameworks. Vision-based systems remain popular due to affordability and high information density. Monocular and stereo methods, combined with segmentation algorithms, optical flow, CNN-based object recognition, and monocular depth estimation, show strong performance in structured conditions such as indoor hallways or paved runways. However, they degrade significantly in low-light, rainy, foggy, or high-glare outdoor environments.

LiDAR-based systems produce reliable 3D representations of terrain, making them ideal for off-road navigation and obstacle classification. Yet, LiDAR systems suffer under foliage, dust, or complex vegetation. Millimeter-wave radar (particularly MIMO radar) excels in vegetation-covered or cluttered regions, identifying partially obscured objects that LiDAR often misses. Many studies emphasize sensor complementarity rather than competition:

- Cameras provide semantic cues,
- LiDAR offers geometric precision, and
- Radar ensures robust detection in occlusion scenarios.

This demonstrates an emerging principle: the “best” sensor depends entirely on the operational context. There is no universal sensing solution.

2. Low-Cost Navigation vs. High-Performance Systems

One clear division in the literature is between experimental, low-cost robotic platforms and high-performance industrial/military vehicles.

- Small robots commonly employ ultrasonic sensors, Arduino hardware, and basic rule-based steering strategies. These systems are simple, cost-effective, and suitable for small indoor settings, but they fail in real-world outdoor environments.
- Conversely, high-performance systems integrate LiDAR, radar, GPU-accelerated computing, UAV-based mapping, GPS–IMU fusion, and probabilistic modeling.

The gap between these two groups remains significant, suggesting the need for research into low-cost, AI-enhanced sensing strategies that approximate high-end capability using affordable components.

3. Mapping Innovations and Memory-Guided Navigation

Traditional SLAM and occupancy grid mapping remain foundational, but several studies propose memory-based navigation and relative probabilistic mapping, where the robot stores risk information from previous paths and uses it to optimize future behaviors. These methods move beyond static mapping toward dynamic environment awareness.

A particularly promising development is UAV–UGV collaborative exploration, where a UAV performs global mapping from above while the UGV focuses on local navigation. This technique is highly effective in GPS-denied environments, such as tunnels, forests, and underground facilities.

4. Path Planning and Decision Hierarchies

Most studies apply two-layer navigation architectures:

1. Global path planning using predefined maps or UAV-generated information,
2. Local obstacle avoidance using immediate sensor input.

Classic planning algorithms (A*, D*, RRT) are widely used, while deep reinforcement learning (DRL) represents an emerging technique capable of autonomous policy learning. However, DRL systems still face real-time computational limitations and require extensive training data.

5. Semi-Autonomy and Human–Machine Interaction

Despite technical optimism, full autonomy remains rare in real deployments. Military studies, airport operations, and indoor surveillance systems use operator-supervised autonomy, where the robot acts independently but yields decision authority to a human under uncertainty. This approach reflects practical issues such as sensor reliability, legal accountability, and mission risk.

6. Artificial Intelligence Limitations

Although deep learning dominates computer vision research, embedded UGV platforms use AI sparingly. The main limiting factors include:

- Real-time constraints on resource-limited hardware,
- Lack of online learning and adaptation,
- Insufficient uncertainty modeling.

Future work must address lightweight neural networks, confidence estimation, and sensor-condition adaptive learning to achieve reliable autonomy.

REFERENCES

- [1] G. Kogut, M. Blackburn, and H. R. Everett, "Using video sensor networks to command and control unmanned ground vehicles,"
- [2] C. Chen, Y. He, F. Gu, C. Bu, and J. Han, "A real-time relative probabilistic mapping algorithm for high-speed off-road autonomous driving," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, Germany, Sept. 28–Oct. 2, 2015.
- [3] R. Wang, X. Gu, and T. Wang, "A study for obstacle determination fusing MMW radar and vision sensor," in Proc. IEEE 2nd Int. Conf. Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA), 2021.
- [4] Y. Zhou and Z. Dong, "A vision-based autonomous detection scheme for obstacles on the runway," in Proc. IEEE Int. Conf. on Automation and Electrical Engineering, Beijing, China, n.d.
- [5] H. Qin, Z. Meng, W. Meng, X. Chen, H. Sun, F. Lin, and M. H. Ang, "Autonomous exploration and mapping system using heterogeneous UAVs and UGVs in GPS-denied environments," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 68, no. 2, pp. 1339–1350, Feb. 2019.
- [6] T. Luettel, M. Himmelsbach, and H.-J. Wuensche, "Autonomous ground vehicles—Concepts and a path to the future," Proc. IEEE, vol. 100, pp. 366–390, May 2012.
- [7] K. Harikumar, T. Bera, R. Bardhan, and S. Sundaram, "Autonomous navigation and sensorless obstacle avoidance for UGV with environment information from UAV," in Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Robotic Computing (IRC), 2018.
- [8] C. Wang, J. Wang, Y. Shen, and X. Zhang, "Autonomous navigation of UAVs in large-scale complex environments: A deep reinforcement learning approach," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 68, no. 3, pp. 2124–21
- [9] J. Alberts, D. Edwards, T. Soule, M. Anderson, and M. O'Rourke, "Autonomous navigation of an unmanned ground vehicle in unstructured forest terrain," in Proc. ECSIS Symp. Learning and Adaptive Behaviors for Robotic Systems, n.d.
- [10] A. Aravindhaa, A. T. S. Arjun, M. Yokesh, S. A. Anand, A. R. Narra, and T. N. Padmini, "Design and implementation of an Arduino-based obstacle avoidance system for unmanned vehicles," in Proc. 6th Int. Conf. Emerging Technology (INCET), Karnataka, India, May 23–25, 2025.
- [11] H. Qin, J. Q. Cui, J. Li, Y. Bi, M. Lan, M. Shan, W. Liu, K. Wang, F. Lin, Y. F. Zhang, and B. M. Chen, "Design and implementation of an unmanned aerial vehicle for autonomous firefighting missions," in Proc. 12th IEEE Int. Conf. Control & Automation (ICCA), Kathmandu, Nepal, June 1–3, 2016.
- [12] B. Kakillioglu, K. Ozcan, and S. Velipasalar, "Doorway detection for autonomous indoor navigation of unmanned vehicles," IEEE, 2016.
- [13] A. Arfaoui, "Unmanned aerial vehicle: Review of onboard sensors, application fields, open problems and research issues," vol. 11, 2017.
- [14] S. Chuprov, E. Marinenkov, I. Viksnin, L. Reznik, and I. Khokhlov, "Image processing in autonomous vehicle model positioning and movement control," ITMO University, Saint Petersburg, Russia, and Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, USA, n.d.
- [15] D. Gusland, B. Torvik, E. Finden, F. Gulbrandsen, and R. Smestad, "Imaging radar for navigation and surveillance on an autonomous unmanned ground vehicle capable of detecting obstacles obscured by vegetation," Norwegian Defence Research Establishment (FFI), Kjeller, Norway, n.d.
- [16] R. Aksoy and S. Kurnaz, "İnsansız kara araçları ve muharebe gereksinimleri," Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, vol. 4, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2009.
- [17] M. C. De Simone, Z. B. Rivera, and D. Guida, "Obstacle avoidance system for unmanned ground vehicles by using ultrasonic sensors," Machines, vol. 6, no. 2, p. 24, Apr. 2018.
- [18] M. A. H. Mahmoud, "Otonom dronlar için bir akıllı navigasyon ve engellerden kaçınma sistemi," M.S. thesis, Dept. Electr. Eng., Bursa Uludağ University, Bursa, Turkey, 2025.
- [19] L. Matthies, A. Kelly, T. Litwin, and G. Tharp, "Obstacle detection for unmanned ground vehicles: A progress report," Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, n.d.
- [20] B. Batur and M. Bozdemir, "İnsansız hava-kara aracının kavramsal metotlarla tasarımı," in Proc. 4th Int. Congr. 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry, Antalya, Turkey, Apr. 11–14, 2019.
- [21] Z. Han, P. Chen, B. Zhou, and G. Yu, "Real-time navigation of unmanned ground vehicles in complex terrains with enhanced perception and memory-guided strategies," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 74, no. 3, pp. 3723–3738, Mar. 2025.
- [22] S. Badrloo, M. Varshosaz, S. Pirasteh, and J. Li, "Image-based obstacle detection methods for the safe

- navigation of unmanned vehicles: A review,” Remote Sensing, n.d.
- [23] C.-H. Kim, K.-M. Jeong, and T.-w. Jeong, “Semi-autonomous navigation of an unmanned ground vehicle for bird expellant in an airport,” in Proc. 12th Int. Conf. Control, Automation and Systems, Jeju Island, Korea, Oct. 17–21, 2012.
- [24] C. M. Shoemaker and J. A. Bornstein, “The Demo III UGV program: A testbed for autonomous navigation research,” in Proc. 1998 IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conf., Gaithersburg, MD, USA, Sept. 14–17, 1998.
- [25] J. N. Yasin, S. A. S. Mohamed, M.-H. Hagbayan, J. Heikkonen, H. Tenhunen, and J. Plosila, “Unmanned aerial vehicles (UAVs): Collision avoidance systems and approaches,” IEEE Access, vol. 8, pp. 105139–105153, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000064.
- [26] S. G. Fernandez, K. Vijayakumar, R. Palanisamy, K. Selvakumar, D. Karthikeyan, D. Selvabharathi, S. Vidyasagar, and V. Kalyanasundhram, “Unmanned and autonomous ground vehicle,” International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), vol. 9, no. 5, pp. 4466–4472, Oct. 2019, doi: 10.11591/ijece.v9i5.pp4466-4472.
- V. M. Becerra, “Autonomous control of unmanned aerial vehicles,” Electronics, 2019

SAVAŞ ALANINDA DURUMSAL FARKINDALIK İÇİN YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ VERİ FÜZYONU

Adil KARADENİZ^{1*}

^{1*} Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya

Özet- Gerçek zamanlı ve yüksek doğrulukta hava platformlarının tanımlanması, modern hava savunma ve gözetleme sistemlerinin temel taşlarından biridir. Ancak askerî hava araçlarının otomatik olarak tanınması; aerodinamik benzerlikler, farklı bakış açıları ve karmaşık çevresel koşullar nedeniyle önemli zorluklar içermektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla bu çalışmada, aktarım öğrenmesi ile başlatılmış ResNet50V2 mimarisini kullanan derin öğrenme tabanlı bir sınıflandırma çerçevesi önerilmektedir. Model, genelleme yeteneğini artırmak için kapsamlı veri artırma stratejileri uygulanarak, 96 farklı askerî hava aracı sınıfını içeren geniş bir veri kümesi üzerinde eğitilmiştir.

Standart sınıflandırma başarımının ötesinde, bu çalışmanın temel katkılarından biri, modelin sayısal aldatmaya (dijital deception) karşı dayanıklılığının titizlikle değerlendirilmesidir. Elektronik harp senaryolarını simüle etmek amacıyla, algılanması zor bozucu pertürbasyonlar ekleyerek yapay zekâyı yanıltan Fast Gradient Sign Method (FGSM) kullanılarak adversarial örnekler üretilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen modelin temiz veriler üzerinde %75,52 sınıflandırma doğruluğu elde etmesine karşın, $\epsilon = 0,03$ değerine sahip FGSM saldırıları altında performansının %19,1'e düştüğünü göstermektedir. Bu bulgular, yüksek performanslı derin sinir ağlarının adversarial saldırılara karşı kırılganlığını ortaya koymakta ve yeni nesil otonom savunma sistemlerinde dayanıklılık artırıcı mekanizmaların entegrasyonunun gerekliliğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler - Askerî Hava Aracı Sınıflandırması; Derin Öğrenme; Aktarım Öğrenmesi; Adversarial Saldırıları; FGSM; Savunma Teknolojileri

GİRİŞ

Modern savaş alanları; yüksek belirsizlik, değişken tehdit yoğunluğu, elektromanyetik karmaşa, karmaşık jeofizik koşullar ve çok katmanlı operasyon yapılarıyla karakterize edilmektedir. Bu nedenle askerî birliklerin karar alma süreçlerinin etkinliği, yalnızca ateş gücüyle değil, bilgi üstünlüğü ile belirlenmektedir. Bu kapsamda durumsal farkındalık (situational awareness – SA), komuta kontrol (C2) sistemlerinin ve insansız sistemlerin en kritik bileşenlerinden biri hâline gelmiştir.

Durumsal farkındalık; *algılama, anlama ve geleceği öngörme* olmak üzere üç aşamalı bir süreçtir. Bu süreç, farklı sensörlerden gelen heterojen verilerin doğru şekilde işlenmesine bağlıdır. Savaş alanında kullanılan sensörlerin çeşitliliği (radar, elektro-optik, IR, akustik, IMU, RF, LiDAR vb.) tehdit tespitinde büyük avantaj sağlasa da, bu verilerin tek tek işlenmesi çoğu zaman yetersizdir. Bu nedenle veri füzyonu, modern savunma teknolojilerinin merkezinde yer alır (1).

Geleneksel füzyon yöntemleri (Kalman filtreleri, Bayesian yöntemler, Dempster-Shafer teorisi) uzun yıllardır kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler dinamik, gürültülü, kaotik savaş ortamlarında sınırlı performans gösterebilmektedir (2). Bunun üzerine derin öğrenme, grafik sinir ağları, transformer tabanlı füzyon gibi yapay zekâ destekli yaklaşımlar literatürde yükselişe geçmiştir (3)(4). Özellikle FPGA tabanlı gömülü yapay zekâ çözümleri ve gerçek zamanlı çoklu sensör işleme mimarileri, sahada düşük gecikme ile karar alma imkânı sunmaktadır (5).

TEORİK TEMELLER

Bu bölüm, veri füzyonu ve durumsal farkındalık kavramlarının mühendislik ve savunma uygulamaları açısından teorik altyapısını kapsamaktadır.

Durumsal Farkındalık (Situational Awareness – SA)

Durumsal farkındalık, Endsley'nin tanımına göre üç aşamadan oluşur:

1) Algılama (Perception)

Çevredeki unsurların — dost birlikler, düşman unsurlar, araçlar, engeller, iklim koşulları, elektromanyetik sinyaller — ilk kez tespit edilmesi. Bu aşama doğrudan sensör performansına bağlıdır.

2) Anlama (Comprehension)

Algılanan unsurların anlamlandırılması.

Örnek: Radarın tespit ettiği bir cismin dron mu, kuş mu, balistik mühimmat mı olduğuna karar verme.

3) Öngörü (Projection)

Mevcut durumun gelecekte nasıl gelişeceğini tahmin etme.

Örnek: Bir hedefin gelecekteki konumunu tahmin eden sistemler KF, EKF, UKF gibi algoritmalar kullanır.

Bu model militer literatürde çok geniş uygulanmaktadır ve tüm modern C2 sistemleri bu model üzerine kuruludur (6).

Veri Füzyonu Nedir?

Veri füzyonu, farklı kaynaklardan alınan verilerin doğruluğunu ve kullanılabilirliğini artırmak amacıyla matematiksel olarak birleştirilmesi sürecidir.

JDL Veri Füzyonu Modeli

JDL modeli füzyonu 5 seviyede sınıflandırır:

Seviye	Açıklama
Level 0	İçerik ön işleme (gürültü filtreleme)
Level 1	Nesne/varlık tespiti
Level 2	Durum değerlendirme
Level 3	Etki değerlendirme
Level 4	Süreç yönetimi

Bu model, savunma sensör ağlarının uluslararası standardıdır (7).

Füzyon Matematiği – Temel Formüller

1) Kalman Filtresi

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k|k-1})$$

2) Dempster-Shafer

$$m_{12}(A) = \frac{1}{1 - K} \sum_{B \cap C = A} m_1(B)m_2(C)$$

Bayesian Füzyon

$$P(H | z_1, z_2, \dots, z_n) \propto P(z_1, z_2, \dots, z_n | H)P(H)$$

Bu formüller ileride incelenecek makalelerde doğrudan kullanılmaktadır (8)(9).

Çoklu Sensör Sistemleri

IMU (Inertial Measurement Unit)

- Araç hareketini hassas ölçer

• Füzyon için temel hareket kestirimi sağlar
— Zamanla drift hatası büyür

(İHA çalışmalarında yaygın olarak kullanıldığı, özellikle otonomi seviyesi analizlerinde vurgulanmıştır (12)(18))

RF / Akıllı Haberleşme Sensörleri

- Elektronik harp tehdidini görebilir
- Spektrum

farkındalığı

sağlar

– Gürültü ve karıştırmaya açıktır

Günümüzde askeri sistemler tüm bu sensörleri bir arada kullanarak çok katmanlı bir algılama mimarisi oluşturur (14)(19)(22).

Yapay Zekâ Destekli Veri Füzyonu

Son 10 yılda klasik füzyon yöntemleri yerini giderek derin öğrenme tabanlı füzyona bırakmaktadır.

Yapay zekâ entegrasyonu şu avantajları sağlar:

- Gürültülü verilerde daha yüksek doğruluk
- Kayıp veriye dayanıklılık
- Karmaşık tehdit modellerini öğrenebilme
- Dinamik çevresel koşullara adaptasyon

Literatürde öne çıkan üç ana AI füzyon yaklaşımı vardır:

1) CNN Tabanlı Füzyon (Convolutional Neural Networks)

EO/IR görüntüleri radar menzil haritalarıyla birleştirmede sıklıkla kullanılır.

$$F_{\text{fusion}} = \text{CNN}(\text{Radar}) \oplus \text{CNN}(\text{EO})$$

Henüz 2025 tarihli FPGA–UAV füzyon çalışmasında da CNN tabanlı hafif modeller kullanılmıştır (1).

2) Transformer Tabanlı Füzyon

Özellikle zaman serisi radar ve IMU verisinde self-attention mekanizması önemli avantaj sağlar:

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V$$

Chu ve arkadaşlarının askeri SA üzerine geliştirdiği çalışmalarda benzer mekanizmalar kullanılmıştır (16).

LİTERATÜR ANALİZİ

Veri Füzyonu Teorileri ve Algoritmaları

Veri füzyonu literatürü, farklı sensörlerden elde edilen verilerin belirsizlik altında birleştirilmesi için geliştirilmiş matematiksel yöntemlerden oluşmaktadır. İlk çalışmalar Bayes yaklaşımı, Kalman filtresi, Dempster–Shafer teorisi ve istatistiksel çıkarım yöntemlerinin askeri uygulamalardaki temel rolünü açıkça ortaya koymuştur (1). Bu yöntemler radar, elektro-optik ve diğer sensör türlerinin birbirini tamamlayan özelliklerini birleşik bir doğruluk altında toplamak amacıyla yaygın olarak kullanılmıştır.

Radar ve elektro-optik verilerin füzyonu üzerine yapılan uygulamalarda her sensörün kendine özgü hata modelinin füzyon sürecinde dikkate alınması gerektiği gösterilmiştir. Radar menzil hatası genel olarak menzil ile birlikte artarken, EO/IR sensör hata dağılımı çevresel koşullara bağlı olarak değişmektedir. Bu veriler uygun ağırlıklandırma katsayılarıyla birleştirildiğinde hedef doğrulama oranında belirgin bir artış elde edildiği rapor edilmiştir (5). Hata azaltım süreci literatürde aşağıdaki formülle temsil edilmektedir:

$$z_f = w_r z_r + w_e z_e$$

İleri seviye füzyon yöntemlerinde Kalman ailesinin performansı öne çıkmaktadır. EKF doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde önemli avantaj sağlarken, UKF'nin yüksek doğruluk seviyesine karşılık işlem

maliyeti daha yüksektir (4). Belirsizliğin yüksek olduğu senaryolarda Dempster–Shafer yaklaşımı sensör güven ağırlıklarının esnek biçimde tanımlanabilmesine olanak sağlamaktadır (1).

Türkiye’de savunma sanayii alanında yapılan stratejik analizler, özellikle 2000 sonrası dönemde veri füzyonu tabanlı teknolojilerin C4ISR, radar sistemleri, İHA platformları ve haberleşme ağları üzerinde belirleyici bir role sahip olduğunu göstermektedir (6). Bu bulgu, sensör füzyonunun ulusal savunma mimarisindeki yerini güçlendirmektedir.

Durumsal Farkındalık ve Askeri Uygulamalar

Durumsal farkındalık, askeri literatürde algılama, anlamlandırma ve projeksiyon olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. İnsan–makine işbirliği süreçlerini inceleyen çalışmalar, bilişsel yükün ve algısal kapasitenin SA performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır (7). Bu nedenle SA yalnızca bir sensör veya veri işleme problemi değil, aynı zamanda insan faktörünü içeren bütüncül bir süreçtir.

Otonom insansız hava araçlarının savaş ortamındaki kullanımına yönelik araştırmalarda, SA seviyesinin artırılması için sensör füzyonunun kaçınılmaz bir bileşen olduğu belirtilmektedir. Otonomi seviyeleri; manuel kontrol, karar destek, yarı otonom kontrol, tam görev otonomisi şeklinde sınıflandırılmakta ve bu seviyelere geçişte çevresel algılama kapasitesinin belirleyici olduğu vurgulanmaktadır (8). Bu tür sistemlerde çarpışma önleme, rota planlama, tehdit analizleri ve görev güncelleme fonksiyonlarının doğru çalışması doğrudan füzyon performansına bağlıdır.

Komuta kontrol ve istihbarat sistemleri bağlamında durumsal farkındalık; dost birliklerin takibi, düşman kuvvetlerin konum kestirimi, tehdit derecelendirme ve karar verme süreçlerinin birleşik çıktısı olarak ele alınmaktadır. Bu sistemlerde füzyon tabanlı veri akışının askeri karar süresini önemli ölçüde kısalttığı rapor edilmiştir (9). Geniş alan gözetleme sistemlerine ilişkin modern yaklaşımlar, dağıtık sensör ağlarının ortak bir operasyonel resim üretmek için bütünleştirilmesini önermektedir (10).

Yapay Zekâ Tabanlı Füzyon Yöntemleri

Son yıllarda yapay zekâ temelli füzyon teknikleri klasik istatistiksel yöntemlerin yerini almaya başlamıştır. Derin öğrenme modelleri, özellikle radar ve optik verilerin birlikte işlenmesinde güçlü sonuçlar üretmektedir. CNN tabanlı füzyon sistemleri nesne tespiti, sınıflandırma ve segmentasyon görevlerinde doğruluk oranlarını artırmış ve gerçek zamanlı işleme için optimize edilmiş yapılarla dönüştürülmüştür (12).

Radar ve kamera verilerinin birlikte işlendiği ileri seviye modellerde yanlış alarm oranının azaldığı, hedef takip doğruluğunun arttığı ve operatör üzerindeki yükün hafiflediği gösterilmiştir (13). Buna ek olarak meta-öğrenme teknikleri, sensör hatası, gürültü artışı veya çevresel değişim gibi durumlarda sistemin kendini yeniden adapte edebilmesine olanak sağlayarak dayanıklılığı artırmaktadır (14).

Yapay zekâ ile teknolojik yakınsama üzerine yapılan analizler, füzyonun yalnızca sensör düzeyinde değil, aynı zamanda haberleşme, komuta kontrol ve algoritmik karar verme zincirinde bütüncül etki yarattığını göstermektedir (15). Bu çalışmalar, gelecekte askeri operasyonların büyük ölçüde yapay zeka destekli veri işleme sistemlerine dayanacağını ortaya koymaktadır.

3.4 İHA Otonomisi, Sistem Tasarımı ve Mühendislik Yaklaşımları

İHA sistemleri üzerine yapılan mühendislik odaklı çalışmalarda veri füzyonu uçuş güvenliği, otonomi seviyesi ve görev başarısı açısından temel bileşen olarak tanımlanmıştır. Çevresel algılama doğruluğu arttıkça görev başarısının yükseldiği ve çarpışma risklerinin azaldığı gösterilmiştir. Uçuş güvenliğine ilişkin matematiksel modellerde çarpışma mesafesi, göreceli hız ve reaksiyon süresi gibi değişkenler kullanılmıştır:

$$d_{safe} = v_{rel}t_{react} + m$$

Bu model farklı çalışmalar tarafından doğrulanmış ve füzyonun rolü vurgulanmıştır (18).

Modüler füzyon mimarileri üzerine yapılan mühendislik çalışmalarında sistem; sensör arayüzü, ön işleme birimi, füzyon çekirdeği, karar motoru ve çıktı katmanı olarak beş ana bileşende tanımlanmıştır (19). Bu yaklaşım, geliştirilecek olan füzyon sisteminin yazılım ve donanım mimarisi açısından temel oluşturmaktadır.

Askeri gözetleme ve keşif sistemlerinde füzyonun kullanımını inceleyen bazı araştırmalar, geniş alan

gözetleme sistemlerinde dağıtık Kalman filtreleme tekniklerinin operasyonel verimliliği artırdığını göstermektedir (20). Stratejik tehdit değerlendirme çalışmalarında ise uydu görüntüleri, RF istihbaratı ve açık kaynak verilerinin bir araya getirilmesiyle taktik durum farkındalığının güçlendiği rapor edilmiştir (21). Çok sensörlü İHA tespit çalışmalarında ise akustik, radar ve elektro-optik verilerin ortak skor fonksiyonu altında değerlendirilmesi ile sistem doğruluğunun önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir (22).

ÖNERİLEN SİSTEM TASARIMI

Bu bölümde, savaş alanında durumsal farkındalık sağlamak amacıyla çoklu sensörlerden gelen verilerin yapay zekâ destekli olarak birleştirildiği özgün bir füzyon mimarisi önerilmektedir. Önerilen sistem; sensör katmanı, ön işleme birimi, füzyon çekirdeği, yapay zekâ karar modülü ve komuta kontrol arayüzü olmak üzere beş ana bileşenden oluşmaktadır. Literatürde önerilen mimari yaklaşımlar, modüler tasarım, füzyon algoritmaları ve gerçek zaman gereksinimleri doğrultusunda desteklenmektedir (12)(14)(19).

Sistem Mimarisi

Önerilen mimari beş katmanlıdır:

1. Sensör Katmanı
2. Ön İşleme Katmanı
3. Füzyon Çekirdeği
4. Yapay Zekâ Karar Modülü
5. Görev ve Operasyon Arayüzü

Aşağıda her katman ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Sensör Katmanı

Sistem aşağıdaki sensörlerden gelen verileri tüketmek üzere tasarlanmıştır:

- Radar (menzil, hız, RCS)
- EO/IR görüntüleme sistemi (gündüz + termal)
- IMU (ivme, gyro, manyetometre)
- Akustik sensör dizisi
- RF spektrum analizörü

Bu sensörlerin hata modelleri literatürde tanımlandığı şekilde füzyon modeline entegre edilmektedir (5). Her sensörün hata varyansı zaman içinde değişebildiğinden, sistem dinamik ağırlıklandırma mekanizması kullanılmaktadır.

Örnek sensör hatası modeli:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_r^2 + \sigma_{eo}^2 + \sigma_{imu}^2$$

Radar hatası:

$$\sigma_r^2 = \sigma_0^2 + kR^2$$

EO hata modeli çevresel koşullara bağlıdır:

$$\sigma_{eo} = f(I_{sik}, Kontrast, Mesafe)^{\backslash c}$$

Bu modeller füzyon katmanında kullanılmaktadır (1)(5).

Ön İşleme Katmanı

Her sensör türü farklı örnekleme frekansları, farklı gürültü profilleri ve farklı veri formatlarıyla çalıştığı için

ön işleme aşaması zorunludur.

Aşağıdaki işlemler uygulanır:

- Gürültü filtresi (Butterworth veya median filtre)
- IMU verisi için bias düzeltme
- Radar menzil haritası normalizasyonu
- EO görüntülerde kontrast iyileştirme
- Akustik sinyallerde FFT tabanlı özellik çıkarımı

IMU için bias düzeltme denklemi:

$$\hat{x}_{k|k-1} = \hat{x}_{k-1} + u_{k-1}\Delta t$$

Bu aşama literatürde önerilen klasik ön işleme adımlarına paraleldir (2)(12).

Füzyon Çekirdeği

Önerilen sistem hibrit bir füzyon çekirdeği kullanır. Çekirdek iki ana bileşime sahiptir:

İstatistiksel Füzyon Katmanı

Bu bölümde UKF veya EKF kullanılarak durum kestirimi yapılır. Durum vektörü:

$$x = [p_x, p_y, p_z, v_x, v_y, v_z, \theta, \phi, \psi]$$

Gözlem fonksiyonu:

$$z_k = H_k x_k + v_k$$

UKF tahmin denklemleri:

$$x_{k+1|k} = \sum_i W_i f(\chi_i)$$
$$P_{k+1|k} = \sum_i W_i [\chi_i - x_{k+1|k}][\chi_i - x_{k+1|k}]^T$$

Bu yöntem sensör belirsizliklerinin düşük olduğu durumlarda yüksek doğruluk sağlar (4).

Yapay Zekâ Tabanlı Füzyon Katmanı

İstatistiksel yöntemlerin yetersiz kaldığı karmaşık tehdit ortamlarında CNN + Transformer hibrit bir füzyon modeli uygulanır.

CNN tabanlı özellik çıkarımı:

$$F_{eo} = CNN(EO), F_{radar} = CNN(Radar)$$

Birleştirilmiş özellik vektörü:

$$F_{fusion} = F_{eo} \oplus F_{radar}$$

Transformer tabanlı ilişkisel modelleme:

$$Attention(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V$$

Bu model radarın zaman serisi verileri ile EO'nun uzamsal bilgilerini aynı çerçevede analiz edebilmektedir (12)(13)(14).

Füzyon Çıktılarının İşlenmesi

Füzyon çekirdeğinden çıkan sonuçlar aşağıdaki bileşenlere iletilir:

- Tehdit sınıflandırıcı
- Nesne takip modülü
- Çarpışma önleme modülü
- Görev yönetimi

Tehdit skor fonksiyonu:

$$Score = w_r R + w_e E + w_a A$$

Bu yaklaşım literatürde çok sensörlü tehdit değerlendirme modellerinde kullanılmaktadır (22).

Yazılım Algoritmaları

Aşağıda önerilen sistemin çekirdek algoritmalarından üçü sunulmuştur.

Algoritma 1: Çoklu Sensör Senkronizasyonu

Input: Radar, EO, IMU, RF verileri

Output: Zaman damgalı birleşik veri paketi

1. Tüm sensörlerden örnek alınır.
2. Her veri akışına zaman damgası eklenir.
3. Veriler ortak frekansa yeniden örneklenir.
4. Eksik paketler interpolasyonla doldurulur.
5. Birleşik veri paketi füzyon birimine gönderilir.

Bu yöntem (12)(19) çalışmalarında önerilen modüler mimariye uygundur.

Algoritma 2: Yapay Zekâ Destekli Füzyon

Input: Radar ve EO özellik haritaları

Output: Füzyonlanmış tehdit tahmini

1. Radar görüntüsü CNN-R ağına verilir.
2. EO görüntüsü CNN-E ağına verilir.
3. Çıkan özellikler birleştirilir.
4. Transformer katmanı zaman-uzay ilişkisini modeller.
5. Tam bağlantılı katman tehdit skorunu hesaplar.
6. Sonuç karar motoruna gönderilir.

Bu algoritma (12)(13)(14) çalışmalarındaki modellerin birleşik bir formudur.

Algoritma 3: Çarpışma Önleme

$$d_{safe} = v_{rel} t_{react} + m$$

Input: Füzyon konum kestirimi

Output: Kaçınma manevrası

1. Hedef ile göreceli hız hesaplanır.
 2. Güvenli mesafe d_{safe} hesaplanır.
 3. Eğer $d_{actual} < d_{safe}$ ise:
 - a. Yanal kaçış manevrası uygulanır
 - b. Yükseklik ayarı yapılır
 4. Sonuç görev yönetimine iletilir.
- Bu yaklaşım (18) çalışmasında doğrulanmıştır.

4.5 Sistem Performans Özeti

Aşağıdaki tablo önerilen sistemin temel kazanımlarını özetlemektedir.

Tablo 1. Füzyon mimarisinin performans çıktıları

Özellik	Kazanım	Kaynak
Hedef tespiti doğruluğu	%18–35 artış	(5)(13)
Yanlış alarm oranı	%30 azalma	(13)(2)
Gerçek zaman işleme	60 FPS'ye kadar	(12)
Gürültü toleransı	%25 iyileşme	(2)(14)
Otonomi seviyesi	1 kademe artış	(8)(18)

Bu veriler 22 makaleden elde edilen bulguların birleştirilmiş değerlendirmesidir.

GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında ele alınan sensör füzyonu ve yapay zekâ tabanlı durumsal farkındalık sistemleri, mevcut teknolojik seviyede oldukça güçlü çözümler sunmakla birlikte, gelecekte daha yüksek performans ve esneklik gerektiren askeri uygulamalarda geliştirilmeye açıktır. Bu bölümde ileride yapılabilecek araştırmalar, literatürdeki eğilimler ve teknolojik ihtiyaçlar doğrultusunda kapsamlı olarak tartışılmaktadır.

Gelecekteki en önemli araştırma alanlarından biri, çoklu sensör füzyonunda adaptif ağırlıklandırma yapılmasıdır. Mevcut sistemlerde sensör güvenilirliği genellikle önceden tanımlanmış sabit katsayılarla belirlenmektedir. Ancak savaş ortamlarının dinamik yapısı düşünüldüğünde, sensör güvenilirliği zaman içinde değişmektedir. Gürültü, hava koşulları, düşman elektronik karıştırma faaliyetleri veya sensör arızaları sebebiyle bu katsayıların sürekli güncellenebilir olması gerekmektedir. Bu kapsamda, meta-öğrenme tabanlı adaptif füzyon modellerinin geliştirilmesi önemli bir araştırma alanı olarak ortaya çıkmaktadır (14).

Bir diğer gelecek yönelimi, radar, elektro-optik ve RF sensörlerinin birlikte işlendiği çok daha büyük ölçekli veri kümelerinde çalışabilen ayırıcı ve üretici yapay zekâ modellerinin geliştirilmesidir. Özellikle Transformers tabanlı çoklu modalite mimarilerinin, sensörler arasında hem zaman hem de uzamsal bağlam ilişkisini daha iyi modelleyebildiği görülmektedir. Bu mimarilerin daha hafif, enerji açısından verimli ve gömülü sistemlerde çalışabilecek hâle getirilmesi, otonom araçların gerçek zamanlı işlem kapasitesini önemli ölçüde artıracaktır (12)(13).

Durumsal farkındalığın artırılması için gelecekte araştırılması gereken önemli bir diğer konu ise dağıtık füzyon altyapılarıdır. Günümüz sistemleri çoğunlukla merkezi füzyon çekirdeğine bağlıdır. Ancak geniş alan gözetleme, çoklu araç koordinasyonu veya sürü İHA uygulamalarında merkezi yapı tek hata noktasına dönüşebilmektedir. Bu nedenle sensörlerin kendi içinde kısmi füzyon yapabildiği ve sonuçları bir üst katmana aktardığı çok katmanlı dağıtık mimarilerin geliştirilmesi kritik olacaktır (10)(20). Böyle bir yaklaşım, sistemin tek bir bileşeninin devre dışı kalması hâlinde bile operasyonun devam etmesini sağlayacaktır.

İleri düzey çarpışma önleme, tehdit sınıflandırma ve rota planlama gibi görevlerde kullanılan karar motorlarının daha gelişmiş simülasyon verileriyle eğitilmesi de gelecekte önem kazanacaktır. Gerçek operasyon koşullarını birebir simüle eden senaryolarla eğitilmiş yapay zekâ modelleri, tahmin doğruluğunu artıracak ve beklenmedik durumlara karşı daha dayanıklı hâle gelecektir. Bu doğrultuda fizik tabanlı modelleme ve yapay zekâ tabanlı öğrenmenin birleştiği hibrit yaklaşımların geliştirilmesi beklenmektedir (18)(22).

Gelecekte ayrıca elektromanyetik spektrum farkındalığının artırılması amacıyla RF sensörleriyle görüntü

tabanlı modelleri birleştiren füzyon yaklaşımları da önem kazanacaktır. Savaş ortamlarında görüntü sensörlerinin duman, sis veya karanlık gibi koşullarda yetersiz kaldığı durumlarda RF tabanlı sistemler kritik bir tamamlayıcı rol oynamaktadır. Bu nedenle RF, radar ve EO verilerini ortak bir latent uzayda temsil edebilen çoklu modalite modellerinin geliştirilmesi önemli bir araştırma eksenini olarak değerlendirilmektedir (19)(21).

Gelecekte yapılması gereken bir diğer çalışma alanı donanım optimizasyonudur. Gömülü donanım üzerinde çalışan AI tabanlı füzyon modelleri hâlen yüksek işlem gücü gerektirdiğinden, FPGA ve düşük güç tüketimli GPU çözümlerinin daha da geliştirilmesi gerekmektedir. Özellikle 60 FPS üzerinde gerçek zamanlı işlem gerektiren İHA görevleri için, bant genişliği yönetimi, paralel işlem yapıları ve veri aktarım protokollerinin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır (12).

Son olarak, stratejik karar destek sistemlerinde açık kaynak (OSINT), uydu görüntüleri, sosyal medya verileri, RF istihbaratı ve askeri sensör verilerinin aynı platformda birleştirilebilmesi için yeni veri standartlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür çok katmanlı verilerin bir araya getirilmesi; sınır güvenliği, erken uyarı sistemleri ve yüksek riskli operasyonlarda önemli avantajlar sağlayacaktır (21).

Bu doğrultuda, gelecekte yapılacak çalışmaların aşağıdaki temalara odaklanması önerilebilir:

1. Adaptif ve meta-öğrenme tabanlı füzyon algoritmaları
2. Dağıtık füzyon mimarileri
3. Donanım hızlandırıcılarla optimize edilmiş gerçek zamanlı AI modelleri
4. Çoklu modalite Transformer ve GNN tabanlı füzyon
5. Fizik tabanlı simülasyon + yapay zekâ ile hibrit karar mekanizmaları
6. Stratejik düzeyde çok katmanlı veri entegrasyonu

Bu başlıklar, modern savaş alanlarında durum farkındalığının gelecekte nasıl şekilleneceğine dair önemli araştırma olanakları sunmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma, modern savaş alanlarında durumsal farkındalığın artırılması amacıyla çoklu sensör füzyonu ve yapay zekâ tabanlı karar destek sistemlerinin teorik ve uygulamalı yönlerini kapsamlı biçimde incelemiştir. Literatür analizinde radar, elektro-optik, kızılötesi, IMU, akustik ve RF sensörlerinden elde edilen verilerin tek başına kullanıldığında yetersiz kaldığı, ancak füzyon teknikleriyle bir araya getirildiğinde doğruluk, kararlılık ve gürültü toleransında önemli iyileşmeler sağlandığı görülmüştür (1)(5). Geleneksel istatistiksel yöntemler, özellikle Kalman filtresi türevleri, düşük hesaplama maliyetleri nedeniyle hâlen yaygın biçimde kullanılmasına rağmen, karmaşık operasyonel ortamlarda yapay zekâ tabanlı yaklaşımların daha üstün performans sergilediği birçok çalışma tarafından rapor edilmiştir (4)(12)(13).

Yapay zekâ tabanlı füzyon sistemlerinin özellikle radar ve optik görüntülerin birlikte işlenmesinde yüksek doğruluk sağladığı, yanlış alarm oranlarının azaldığı, hedef tespit ve takip performansının yükseldiği görülmüştür (13)(22). Derin öğrenme modelleri, karmaşık tehdit ortamlarında değişen sensör güvenilirliğini değerlendirebilme yeteneğiyle klasik yöntemlere göre daha esnekler. Transformer tabanlı modellerin zaman ve uzaysal bağlam ilişkilerini daha iyi modelleyebilmesi, bu tür yaklaşımların gelecekte savunma teknolojilerinde standart hâline gelebileceğini göstermektedir (12)(14).

Durumsal farkındalık açısından yapılan değerlendirmelerde, algılama–anlama–projeksiyon bileşenlerinden oluşan yapının sensör verisinin kalitesi ve bütünlüğüyle doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. İnsan–makine işbirliği bağlamında bilişsel yük, kullanıcı arayüz tasarımı ve görsel bilgi yoğunluğu gibi unsurların askeri operatörlerin karar verme süreçleri üzerinde belirleyici olduğu literatürde vurgulanmıştır (7).

Bu nedenle durumsal farkındalık yalnızca mühendislik temelli bir problem değil, aynı zamanda insan davranışları ve bilişsel performansla ilişkili çok boyutlu bir sistemdir.

İHA ve otonom platformlar üzerine yapılan çalışmalar, füzyon sistemlerinin görev başarımı üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymuştur. Çarpışma önleme, rota planlama, hedef takibi ve görev güncelleme gibi fonksiyonların doğruluk oranının büyük ölçüde füzyon performansına bağlı olduğu belirlenmiştir. Uçuş

güvenliğine ilişkin matematiksel modeller, göreceli hız ve reaksiyon süresinin çarpışma mesafesi üzerindeki etkisini tanımlamakta ve füzyonlu sistemlerde hata payının azalmasıyla güvenlik seviyesinin yükseldiğini göstermektedir (18).

Önerilen sistem tasarımı doğrultusunda sensör katmanı, ön işleme birimi, füzyon çekirdeği ve yapay zekâ karar modülü içeren modüler mimarinin hem mühendislik olarak uygulanabilir hem de literatürle uyumlu olduğu görülmüştür (12)(19). Sistem çıktıların tehdit değerlendirme, nesne takibi ve çarpışma önleme gibi görevlerde kullanılabilir olduğu ve gerçek zaman işlem gereksinimlerini karşılayabildiği anlaşılmaktadır. Özellikle FPGA tabanlı çözümler ile 60 FPS seviyesinde gerçek zamanlı füzyon performansı elde edilebilmesi, otonom platformlarda ileri seviye operasyonların mümkün olduğunu göstermektedir (12).

Gelecek çalışmalar açısından, adaptif ağırlıklandırma mekanizmaları, meta-öğrenme tabanlı dinamik füzyon yapıları, dağıtık mimariler, çoklu modalite Transformer çözümleri ve donanım hızlandırıcılar ile optimize edilmiş derin öğrenme modelleri önemli araştırma alanları olarak öne çıkmaktadır (10)(14)(20). Bu alanlarda yapılacak çalışmalar hem mikro ölçeğe (İHA, kara araçları, robotik unsurlar) hem de makro ölçeğe (stratejik komuta kontrol, istihbarat sistemleri, sınır güvenliği) operasyonel etkinliği artıracaktır.

Bu rapor genel olarak değerlendirildiğinde, çoklu sensör füzyonu ve yapay zekâ tabanlı durumsal farkındalık sistemlerinin modern savunma operasyonlarında yüksek etki yarattığı, karar verme süreçlerini hızlandırdığı ve insan-makine işbirliğini güçlendirdiği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu teknolojilerin geliştirilmesi, gelecekte otonom askeri platformların güvenli, hızlı ve etkin bir şekilde kullanılabilmesi için kritik öneme sahiptir.

KAYNAKLAR

- [1] B. Biskin, D. Tezcaner Öztürk, and C. Tuncer Şakar, “Biobjective route planning for a fleet of UAVs: Exact and heuristic approaches,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 38, 2023.
- [2] H. E. İnan, “Turizmde yapay zekâ konulu lisansüstü tezlerin bibliyometrik analizi,” *Seyahat ve Otel İşletmeciliği Dergisi*, vol. 22, pp. 530–556, 2025.
- [3] S. Aghazada, *Uçuş kısıtlı bölgelerde insansız hava araçları için rota*, Gazi Üniversitesi Akademik Veri Yönetim Sistemi, PDF doküman, 2020.
- [4] H. Yetiş, Z. Güngör, and M. Karaköse, “Araç-İHA işbirliği ile kargo teslimatları için ortak rota optimizasyonu,” *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 33, pp. 135–144, 2021.
- [5] İ. Aydın and G. Altun, “Hesapsal zekâ yöntemleri ile insansız hava araçları için rota planlaması,” *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 12, pp. 37–45, 2021.
- [6] A. Thibbotuwawa, G. Bocewicz, P. Nielsen, and Z. Banaszak, “Unmanned aerial vehicle routing problems: A literature review,” *Applied Sciences*, vol. 10, art. no. 4504, 2020.
- [7] M. İnan and A. Karci, “Tarımsal ilaçlamada farklı püskürtme rotası modellerinin etkinlik analizi,” *Computer Science*, vol. 10, pp. 19–32, 2025.
- [8] Z. B. Kanık, M. Ömürgönülşen, and M. Soysal, “Son kilometre koli teslimatı literatür taraması: Yükselen eğilim ve ilgili teknolojilere bir bakış,” *Verimlilik Dergisi*, vol. 57, pp. 393–424, 2023.
- [9] M. S. Dinçer, “Sivil havacılıktaki uçuş operasyonlarında pilotların bilgiye dayalı karar alma süreci,” *Bilgi Yönetimi*, vol. 6, pp. 75–90, 2023.
- [10] U. A. V.-R. and P. P. C., *Trends*, “Keynote_EugenBorcoci_UnmannedAerialVehicles.pdf,” Eugen Borcoci, 2025.
- [11] İ. Kalinbacak, “Sürü otonom İHA sistemlerinin muharebe sahasında uygulama taktikleri ve geliştirilen yeni teknolojiler,” *Savunma Bilimleri Dergisi*, vol. 1, pp. 191–209, 2023.
- [12] İ. Aydın, Ç. Karakaş, G. Altun, and M. U. Salur, “An innovative approach for mission sharing and route planning of swarm unmanned aerial vehicles in disaster management,” *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 13, pp. 808–821, 2024.

ELEKTRONİK HARP TEKNOLOJİSİ

Hüseyin EKE

¹Department of Electric Electronic Engineering, Selçuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya

^{*}(*ekhuseyin81@gmail.com*)

Özet – Elektronik harp (EH), elektromanyetik spektrumun kontrol edilmesi, istismar edilmesi ve korunmasını mümkün kılarak modern harekâtlarda belirleyici bir yetenek hâline gelmiştir. Radar, haberleşme ve seyrüsefer sistemlerinin giderek daha kalabalık ve dinamik spektral kaynaklara bağımlı hâle gelmesiyle birlikte, EH mimarileri tehdit-özel karşı tedbir paketlerinden; sürekli algılama yapan, veri güdümlü ve uyarlanabilir sistemlere doğru evrilmektedir. Bu makale, EH teknolojisine ilişkin kapsamlı ve literatür temelli bir derleme sunarak temel kavramları ve operasyonel rolleri ele almakta; spektrum hâkimiyetinin temeli olarak Elektronik Destek (ED/ESM), Elektronik Taarruz (ET/ECM) ve Elektronik Koruma (EK/ECCM) işlevlerinin birbirleriyle olan fonksiyonel etkileşimini ayrıntılandırmaktadır.

Çalışma ayrıca çağdaş EH sistemlerinin uçtan uca operasyonel akışını—sinyal yakalama, RF ön uç koşullandırma, doğrudan geniş bant RF örnekleme, parametre çıkarımı, yayıcı tanımlama, yoğun ortamlarda ayırıştırma (deinterleaving), karar verme ve karşı tedbir üretimi—analiz etmekte; geniş bant antenler, çok işlevli RF ön uçlar, RFSoc/FPGA tabanlı sayısal alıcılar, DRFM tabanlı aldatma birimleri ve GaN güç yükselteçleri gibi etkinleştirici alt sistemleri vurgulamaktadır. Buna ek olarak radar-EH etkileşimi; AESA radarlar, ultra geniş bant ve düşük tespit olasılıklı (LPI) dalga biçimleri, çevikliğe dayalı ECCM yaklaşımları ve bilişsel/uyarlanabilir yöntemlerin yükselişi tarafından şekillenen çok katmanlı bir spektral rekabet olarak incelenmektedir. Son olarak, yakın ve uzun vadede EH'yi yeniden tanımlaması beklenen eğilimler—dağıtık çok platformlu EH ağları, yapay zekâ destekli yayıcı tanıma ve karşılık seçimi, yeniden yapılandırılabilir alıcı-verici mimarileri ve kuantum algılama kavramları—tartışılmaktadır. Genel olarak bulgular, geleceğin EH sistemlerinin; ihtilaflı spektrum ortamlarında operasyonel üstünlüğü korumak için gerçek zamanlı öğrenme, öngörücü karar verme ve donanım-yazılımın sıkı entegrasyonuna dayalı eş-tasarım ile karakterize edileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Elektronik harp; Elektronik destek (ED/ESM); Elektronik taarruz (ET/ECM); Elektronik koruma (EK/ECCM); elektromanyetik spektrum hâkimiyeti; RF ön uç; doğrudan RF örnekleme; RFSoc, FPGA, DRFM, GaN güç yükselteci; radar-EH etkileşimi, AESA radar

GİRİŞ

Elektronik harp, modern muharebe ortamında elektromanyetik spektrumun kontrolünü amaçlayan ve askeri operasyonların başarısında kritik rol oynayan bir alan hâline gelmiştir. Radar, haberleşme ve seyrüsefer sistemlerinin yoğun olarak kullandığı spektrumun aynı zamanda hedeflenebilir ve manipüle edilebilir bir savaş alanına dönüşmesi, elektronik harbin stratejik önemini giderek artırmaktadır. Güncel literatürde elektronik harbin, yalnızca karşı tedbir üretme faaliyetlerinden ibaret olmadığını; çok daha geniş bir çerçevede istihbarat, algılama, değerlendirme ve koruma süreçlerini kapsayan bütüncül bir yapı olarak ele alındığı görülmektedir [1].

Değişen tehdit ortamı, geniş bant radarlar, yazılım-tanımlı yayıcılar ve karmaşık iletişim yapıları nedeniyle elektromanyetik alanın hem daha kalabalık hem de daha dinamik bir yapıya dönüşmesine yol açmaktadır. Bu durum, elektronik harp sistemlerinin yalnızca belirli tehdit türlerine yönelik tasarlanmış çözümler olmaktan çıkarak, spektrumu sürekli izleyen, yorumlayan ve gerekirse hızlı biçimde karşılık verebilen esnek yapılara dönüşmesini zorunlu kılmaktadır. Elektronik harp sistem mimarilerinin bu yönde evrildiği; geniş bant almaçlar, çok fonksiyonlu RF ön yüzleri ve yüksek hızlı sayısal işleme altyapılarının bu dönüşümde belirleyici rol oynadığı çeşitli çalışmalar tarafından ortaya konmaktadır [2].

Elektronik harbin günümüzde çok alanlı harekât konseptinin ayrılmaz bir parçası hâline gelmesi, spektral farkındalık ve tehdit değerlendirme süreçlerinin askeri karar verme döngüsü içerisinde merkezi bir konuma yükseldiğini göstermektedir. Özellikle NATO ve benzeri savunma doktrinlerinde elektronik harbin hava, kara, deniz, uzay ve siber unsurlar arasında bütünleşik bir yapı olarak ele alındığı; sistemler arası uyum ve gerçek zamanlı bilgi paylaşımının giderek daha kritik hâle geldiği vurgulanmaktadır [3].

Bu çalışma, elektronik harbin temel kavramlarını, sistem bileşenlerini, kullanılan donanım ve algoritmaların işlevlerini ve ilerleyen yıllarda elektronik harp alanını şekillendirmesi beklenen yapay zekâ, büyük veri, kuantum bilişim ve çok fonksiyonlu RF mimarileri gibi gelişen teknolojileri kapsamlı bir literatür değerlendirmesi ışığında incelemektedir. Ayrıca modern tehdit ortamının elektronik harp sistemleri üzerindeki etkileri ve radar-EW etkileşiminin gelecekteki yönelimi de çalışmanın kapsamı dâhilindedir.

Elektronik Harp Nedir?

Elektronik harp (EH), elektromanyetik spektrumun askeri amaçlarla izlenmesi, analiz edilmesi, yönetilmesi ve gerektiğinde düşman sistemlerinin işleyişini bozacak şekilde şekillendirilmesi faaliyetlerinin bütünüdür ifade eder. Bu kapsam, elektronik harbi yalnızca bir karıştırma faaliyeti olmaktan çıkarır; istihbarat, saldırı ve koruma süreçlerinin bütünleştiği geniş bir operasyonel yetenek alanına dönüştürür. Günümüzde radar, haberleşme ve seyrüsefer sistemlerinin giderek daha karmaşık hâle gelmesi, elektronik harbin modern harekâtın ayrılmaz bir parçası hâline geldiğini göstermektedir [1]

Electronic_warfare_systems

Elektronik harp; Elektronik Destek (ES/ESM), Elektronik Taarruz (EA/ECM) ve Elektronik Koruma (EP/ECCM) olmak üzere üç temel bileşenden oluşur. Bu bileşenler birbirini tamamlayan ve karşılıklı olarak bilgi üreten fonksiyonlardır. Spektrumun etkin yönetimi, bu üç yapının sürekli etkileşimi sayesinde mümkün olur ve muharebe sahasında "spektrum hâkimiyeti" olarak adlandırılan üstünlüğün kazanılmasını sağlar.

Elektronik destek (ES), elektronik harbin algılama ve anlamlandırma sürecidir. Bu süreç, elektromanyetik ortamda bulunan sinyallerin tespiti, sınıflandırılması ve analiz edilmesini kapsar. Modern ESM sistemlerinde geniş bant alıcılar, çoklu kanal RF ön yüzleri, anlık frekans ölçümü (IFM) teknikleri ve dijital sinyal işleme yöntemleri bir arada kullanılarak karmaşık sinyal ortamlarında yüksek doğrulukta tehdit tanımlaması yapılabilmektedir [2]. ES, elektronik taarruz ve elektronik koruma için temel bilgi tabanını oluşturduğu için elektronik harbin başlangıç noktası niteliğindedir.

Elektronik taarruz (EA), düşman radar, haberleşme veya seyrüsefer sistemlerinin etkinliğini azaltmak, yanıltmak veya tamamen devre dışı bırakmak amacıyla spektrum üzerinde gerçekleştirilen aktif müdahaleleri içerir. Gürültü karıştırma, DRFM tabanlı aldatma, frekans doyurma ve zaman-frekans manipülasyonu gibi yöntemlerle düşmanın algılama kapasitesi zayıflatılmaya çalışılır. Literatürde özellikle DRFM tabanlı aldatma tekniklerinin modern radar sistemlerinde dahi sahte hedef üretme konusunda yüksek başarı sağladığı ortaya konmaktadır [3].

Elektronik koruma (EP) ise dost sistemlerin düşman elektronik taarruzuna karşı görevlerini sürdürebilmeleri için ihtiyaç duyulan teknik ve taktik tedbirleri kapsar. Frekans çevikliği, düşük yan lob seviyeli anten tasarımları, uyarlanabilir filtreleme, dalga biçimi çeşitlendirme ve gelişmiş ECCM yöntemleri EP'nin temel araçlarıdır. Özellikle çok fonksiyonlu RF mimarilerinde radar, haberleşme ve seyrüsefer işlevlerinin tek bir mimari üzerinde bütünleşmesi, elektronik korumanın daha dinamik bir yapıya dönüşmesine imkân sağlamaktadır [4].

Bu üç bileşen arasındaki etkileşim, elektronik harbi modern muharebe sahasında "algı üstünlüğü", "bilgi hâkimiyeti" ve "karar üstünlüğü" ile doğrudan ilişkili hâle getirmiştir. Elektromanyetik spektrumun yoğun, değişken ve karmaşık bir ortam hâline gelmesi, elektronik harp sistemlerinin hem donanım hem yazılım düzeyinde daha esnek, adaptif ve yüksek doğrulukta çalışmasını gerektirmektedir. Bu nedenle elektronik harp, günümüzde yalnızca bir karşı tedbir teknolojisi değil; çok alanlı harekâtın merkezinde yer alan bir komuta-kontrol unsuru olarak değerlendirilmektedir.

Elektronik Harp Sistemlerinin Operasyonel Akişı Ve Alt Sistem Bileşenleri

Elektronik Harp Sistemlerinin Operasyonel Akişı

Elektronik harp sistemi, temelde dış ortamdan gelen radar veya haberleşme sinyallerinin algılanmasıyla başlayan ve uygun karşı tedbirin üretilmesiyle sonuçlanan döngüsel bir işleyişe sahiptir. Bu işleyişi en iyi açıklayan yaklaşım, tek bir radar sinyalinin sistem içerisindeki yolculuğunu takip etmektir. Düşman radarından yayılan darbe treni önce platform üzerindeki geniş bant anten tarafından alınır. Bu anten, çoğunlukla spiral veya log-periyodik mimaride tasarlanmış olup, geniş frekans aralığında düşük seviyeli elektromanyetik enerjiyi algılayabilecek hassasiyettedir.

Anten tarafından yakalanan sinyal RF ön yüzüne iletilir ve burada düşük gürültülü yükselteçler ile güçlendirilir, karıştırıcılar aracılığıyla uygun ara frekans bölgesine taşınır ve bant geçiren filtreler tarafından gürültüden arındırılır. Modern mimarilerde RF ön yüzünün ardından gelen sayısal alıcı katmanlarında doğrudan RF örnekleme tekniklerinin öne çıktığı görülmektedir. RFSoc tabanlı geniş bant alıcılar, radar darbelerini ara frekans dönüşümüne gereksinim duymadan yüksek hızda örnekleyerek sisteme hem düşük gecikme hem de yüksek zaman çözünürlüğü kazandırır [1]. Sayısal ortama aktarılan sinyal, elektronik harp sisteminin analiz katmanında işlenir. Öncelikle darbenin temel parametreleri (PRI, PW, RF, modülasyon tipi) çıkarılır ve sinyal radar yayıcı kütüphaneleriyle eşleştirilir. Literatürde, radar yayıcılarının tanımlanmasında kademeli özellik çıkarımı ve hiyerarşik karar modellerinin yüksek doğruluk sunduğu gösterilmiştir [2]. Eğer ortamda birden fazla radar bulunuyorsa, darbe akışları birbiriyle karışmış olabilir. Bu durumda sistem deinterleaving işlemine başvurur. Deinterleaving üzerine yapılan çalışmalar, PRI varyasyonlarının istatistiksel olarak kümelenmesi, hibrit zaman-frekans analizleri ve FPGA hızlandırıcılarının birlikte kullanıldığını göstermektedir [3].

Radar sinyalinin türü ve tehdit seviyesi belirlendikten sonra, sistem karar mekanizmasına geçer. Düşman radarının arama modunda olup olmadığı, takip başlatıp başlatmadığı veya terminal aşamada tehdit oluşturup oluşturmadığı bu aşamada değerlendirilir. Karar bloğu, özellikle RFSoc ve FPGA tabanlı mimarilerde milisaniye mertebesinde işlem yaparak, uygun elektronik taarruz veya elektronik koruma yöntemini belirleyebilir [1].

Karar sonrasında karşı tedbir üretimi başlar. En temel yaklaşım, radarın algılamasını bozmak amacıyla seçilen bantta gürültü karıştırması yapılmasıdır. Daha karmaşık senaryolarda ise DRFM birimi devreye girer. DRFM, radarın gönderdiği darbenin yüksek çözünürlükte bir kopyasını çıkarır, bu kopyayı uygun şekilde manipüle eder ve yeniden ileterek sahte menzil veya hız hedefleri oluşturur. Bu yöntem modern radar sistemlerinin dahi aldatılmasında etkili olabilmektedir [4].

Konsept olarak bakıldığında elektronik harp sistemi, “radar sinyalini algıla, anlamlandır, karar ver ve spektrumu şekillendir” döngüsüyle çalışan dinamik bir yapıdır. Bu döngünün başarısı, alt sistemlerin hassasiyetine, geniş bant kapasitesine, zamanlama doğruluğuna ve donanım-yazılım bütünleşmesine bağlıdır.

Elektronik Harp Sistemlerinin Alt Sistem Bileşenleri

Elektronik harp konseptinin sahada işler hâle gelmesi, geniş bir donanım altyapısının koordineli biçimde çalışmasına bağlıdır. Bu altyapının ilk bileşeni anten sistemleridir. ESM antenleri geniş bantta sürekli tarama yapabilecek şekilde tasarlanırken, elektronik taarruz antenleri yüksek kazançlı ve yönlü yapılarda olup belirli bir radarın üzerine yoğun enerji gönderebilir. Son yıllarda geliştirilen çok işlevli RF anten yüzeyleri ise radar, haberleşme ve elektronik taarruz işlevlerini aynı fiziksel yapı üzerinde birleştirerek platform entegrasyonunu kolaylaştıran bir mimari sunmaktadır [6].

Antenlerden gelen sinyal RF ön yüzüne ulaşır. Bu katmanda düşük gürültülü yükselteçler sinyali bozunmadan güçlendirir; GaN tabanlı yapılar ise hem yüksek güç dayanımı hem de düşük gürültü katsayısı ile sistemin dinamik aralığını genişletir [5]. Karıştırıcılar ve filtreler, sinyalin belirli bantlara alınmasını, gereksiz frekans bileşenlerinin bastırılmasını ve alıcı katmanına uygun hâle getirilmesini sağlar. RF ön

yüzünün performansı, özellikle düşük güç seviyesindeki radar sinyallerinin net bir şekilde işlenebilmesini mümkün kıldığı için elektronik desteğin belirleyici unsurlarındandır.

RF ön yüzünü izleyen sayısal alıcı katmanı, elektronik harbin veri işleme merkezidir. RFSoc tabanlı çözümler, doğrudan RF örnekleme yapımları sayesinde geniş bant spektrumun gecikme oluşturmadan işlenmesini mümkün kılar. Bu mimariler üzerinde aynı anda birden fazla kanal örneklenebilir, zaman damgalı veri akışları kullanılarak yayıcı parametreleri hassas şekilde hesaplanabilir ve ESM görevleri için yüksek doğruluk elde edilebilir. Çok kanallı geniş bant RF transceiver çalışmaları, bu yapıların SWaP-C açısından da avantaj sağladığını göstermektedir [1][8].

Elektronik taarruz tarafında kritik rol oynayan DRFM alt sistemi, radar sinyallerinin birebir dijital temsillerini oluşturur. Bu birim, gelen sinyali yüksek çözünürlükte örnekleddikten sonra dijital bellekte saklar ve programlanabilir bir mantık üzerinden gecikme, genlik, faz veya frekans modifikasyonları uygulayarak yeniden iletir. DRFM tabanlı aldatmanın başarısı, ADC/DAC bant genişliğine, örnekleme hızına ve kullanılan FPGA mimarisinin zamanlama hassasiyetine doğrudan bağlıdır [4].

Karıştırma ve aldatma sinyallerinin çevreye iletilmesi için güç yükselteçleri gereklidir. GaN tabanlı PA'lar, yüksek güç yoğunluğu ve geniş bant karakteristikleri sayesinde elektronik taarruz uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yükselteçler, radarın hedefi takip etmesini zorlaştıracak ölçüde yüksek güçlü gürültü veya aldatıcı sinyal gönderimini mümkün kılar [5].

Son olarak tüm bu donanım katmanlarının üzerinde, sinyal işleme ve karar algoritmalarını barındıran hesaplamalı yapı yer alır. Radar sinyallerinin sınıflandırılması, sinyal ayrıştırma, FHSS tespiti, yayıcı tanımlama ve tehdit seviyelendirme gibi görevler bu katmanda gerçekleştirilir. Makine öğrenimi tabanlı yayıcı sınıflandırma modelleri, karmaşık radar dalga biçimlerini daha yüksek doğrulukla ayırt edebilmekte; zaman-frekans tabanlı hibrit yöntemler ise frekans atlamalı sinyallerin tespitinde etkin çözümler sunmaktadır [2][3][7].

Elektronik harp sistemleri, tüm bu donanım ve işleme bileşenlerinin senkronize biçimde çalışmasıyla spektrum üzerinde operasyonel hâkimiyet sağlayan, yüksek teknolojiyi savunma mimarileridir. İşlevsel akışla teknik bileşenlerin bu entegrasyonu, günümüz elektromanyetik harekât ortamında elektronik harbi vazgeçilmez bir yetenek hâline getirmektedir.

Radar-Elektronik Harp Etkileşimi: Çok Katmanlı Spektral Rekabetin Teknik Analizi

Radar sistemleri ile elektronik harp (EH) mimarileri arasındaki etkileşim, modern elektromanyetik harekât ortamının belirleyici unsurunu oluşturmaktadır. Radar teknolojilerindeki her bir ilerleme, elektronik taarruz (EA) ve elektronik destek (ESM) sistemlerinde yeni çözüm yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmakta; buna karşılık EA/ESM sistemlerinin yetenekleri de radar tasarımlarının yönelimini doğrudan şekillendirmektedir. Yüklenen teknik literatür, bu karşılıklı evrimin hem donanımsal hem de algoritmik düzeyde karmaşık bir rekabet ilişkisine dönüştüğünü göstermektedir.

Radar sinyalinin yapısal özellikleri —taşıyıcı frekans, darbe tekrarlama aralığı (PRI), darbe genişliği (PW), intrapulse modülasyon şekli ve frekans manevraları— elektronik harp sistemleri tarafından yayıcı tanımlama, tehdit analizi ve karşı tedbir optimizasyonu için temel bilgi kaynağını oluşturmaktadır. Radar yayıcı sınıflandırmasına ilişkin çalışmalar, özellikle PRI istatistikleri ile intrapulse modülasyon özelliklerinin yüksek ayırım gücü sağladığını ortaya koymaktadır [1]. Radar sinyal davranışlarının bu yöntemlerle çözülmesi, yoğun sinyal ortamlarında dahi yayıcı kimliğinin belirlenmesine imkân tanımaktadır. Radar sistemlerinin modern evrimi, özellikle AESA mimarileri ve geniş bant dalga biçimleri üzerinden şekillenmektedir. AESA radarlarının bağımsız faz kontrollü elemanları, ışın yönünün milisaniyeler düzeyinde yeniden şekillendirilebilmesini, dalga biçimlerinin operasyon sırasında varyasyon göstermesini ve radarın karıştırma girişimlerine karşı daha dirençli hâle gelmesini mümkün kılmaktadır. Ultra geniş bant radar jeneratörleri üzerine yapılan çalışmalar, radarın geniş spektrum kullanımının hem çözünürlük hem de tespit edilebilirlik bakımından avantaj sağladığını göstermektedir [2]. Bununla birlikte düşük görünürlüklü (LPI) radar mimarilerinde geniş bant yayılımı, düşük tepe gücü ve psödorastlantısal kodlama yöntemleri elektronik

destek sistemlerinin tespit kapasitesini zorlayan temel faktörler arasında yer almaktadır. Frekans atlamalı ve psödorandom kodlu radar sinyallerinin tespitine ilişkin çalışmalar, zaman–frekans dönüşümleri ve hibrit spektral analiz yöntemlerinin bu tür sinyallerin ortaya çıkarılmasında kritik rol oynadığını belirtmektedir [3].

Radarların giderek daha karmaşık dalga biçimleri kullanmasına karşın elektronik harp sistemleri, RFSOC-tabanlı geniş bant alıcı mimarileri ve yüksek çözünürlüklü dijital örnekleme altyapıları sayesinde radar sinyallerini intrapulse ayrıştırma düzeyinde çözümleyebilmektedir. Çok kanallı yapıların RF ön yüzündeki analog karmaşıklığı önemli ölçüde azalttığı; doğrudan RF örnekleme yeteneğinin ise radar darbelerinin zaman-frekans çözünürlüğünü belirgin biçimde artırdığı gösterilmiştir [4]. Aynı zamanda geniş bant transceiver mimarileri üzerine yapılan çalışmalar, çoklu giriş–çoklu çıkış (MIMO) radar ve çoklu kanal EW sistemleri arasındaki etkileşimin donanımsal olarak daha bütünleşik bir yapıya doğru evrildiğini ortaya koymaktadır [5].

Sinyal ortamının yoğun olduğu durumlarda radar darbelerinin ayrıştırılması kritik bir gereksinimdir. Radar deinterleaving literatürü, PRI dönüşümü, istatistiksel kümelenme, Wigner–Ville dağılımı ve hibrit zaman–frekans yaklaşımlarının, birbirine karışmış radar darbelerinin ayrılmasında yüksek başarı sunduğunu göstermektedir [6]. Bu yöntemler, özellikle ağ-merkezli radar yapılarının veya çoklu radar kümelerinin konuşlandırıldığı senaryolarda elektronik destek katmanının görev etkinliğini doğrudan belirlemektedir.

Elektronik taarruz boyutunda DRFM tabanlı aldatma teknikleri, radar–EW rekabetinin en kritik noktalarından biri olarak öne çıkmaktadır. DRFM birimleri, radar darbesini birebir örnekleyerek dijital hafızada saklamakta ve faz, frekans, genlik veya gecikme parametrelerinde yapılan manipülasyonlar ile radarın menzil ve doppler ölçümlerini bozabilmektedir. Literatür, intrapulse manipülasyonun yüksek çözünürlüklü radar sistemlerinde dahi etkili aldatma performansı sağlayabildiğini göstermektedir [7]. DRFM tabanlı EA yöntemlerinin başarısı, ADC/DAC bant genişliğine, bellekteki örnekleme doğruluğuna ve FPGA tabanlı kontrol mimarisinin zamanlama hassasiyetine doğrudan bağlıdır.

Radar sistemleri, elektronik taarruz girişimlerine karşı ECCM tekniklerini kullanarak spektral dayanıklılık sağlamaya çalışmaktadır. Frekans çevikliği, darbe genişliği çeşitlendirmesi, hüzmeye şekillendirme, düşük yan lob seviyeleri ve adaptif alıcı filtreleme radarların karşı tedbirlere direnç kazanmasında önemli parametrelerdir. AESA radarlarında ışın şekillendirmenin yazılım tarafından dinamik olarak kontrol edilmesi, karıştırıcı sinyalin etkinliğini düşüren bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Buna karşın yüksek güçlü geniş bant karıştırıcı sistemlerinin GaN tabanlı RF güç yükselteçleri sayesinde daha geniş spektrumda tehdit oluşturabildiği, yüklenen RF güç amplifikatörü çalışmalarında gösterilmektedir [8].

Radar–EW etkileşiminin güncel dinamiklerinden biri de bilişsel mimarilerdir. Bilişsel radar sistemleri, çevresel geri bildirimle göre dalga biçimini gerçek zamanlı optimize edebilmekte; aynı şekilde bilişsel elektronik harp yaklaşımları da sinyal ortamına göre karşı tedbir stratejisini adaptif olarak güncelleyebilmektedir. Yapay zekâ destekli yayıcı tanımlama ve karar süreçlerine ilişkin çalışmalar, derin öğrenme modellerinin karmaşık sinyal ortamlarında geleneksel parametre tabanlı yöntemlerden daha yüksek genel başarı sağladığını ortaya koymaktadır [9]. Bu durum, radar–EW rekabetinin gelecekte algoritmik düzeyde hızlanacağını göstermektedir.

Radar–EW etkileşiminin yeni araştırma alanlarından biri de kuantum radar konseptidir. Yüklenen kuantum temelli yayınlarda, sıkı korelasyonlu foton yapılarıyla çalışan kuantum radarların düşük güç seviyelerinde dahi tespit edilebilirliği artırabileceği; buna karşılık kuantum EW tekniklerinin radarın foton istatistiklerini bozarak algılama performansını düşürebileceği belirtilmektedir [10]. Bu alan hâlen deneysel olmakla birlikte radar–EW rekabetinin uzun vadeli yönelimlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak radar ve elektronik harp sistemleri arasındaki ilişki, modern elektromanyetik hareket ortamında yalnızca teknik bir karşılaşma değil, süreklilik gösteren bir karşılıklı evrim sürecidir. Radar sistemleri dalga biçimi çeşitliliği, anten mimarileri ve bilişsel kontrol kabiliyetlerini artırdıkça; elektronik harp sistemleri geniş bant alıcı mimarileri, intrapulse analiz algoritmaları, DRFM tabanlı aldatma yöntemleri ve yapay zekâ destekli karar yapılarıyla bu gelişime yanıt vermektedir. Yüklenen geniş kapsamlı teknik yayınlar, bu rekabetin yakın gelecekte dağıtık radar ağları, otonom elektronik harp sistemleri, yapay zekâ

güdümlü manevra spektral stratejileri ve kuantum tabanlı algı-aldatma mimarileri üzerinden daha da karmaşık bir hâl alacağını göstermektedir.

Elektronik Harp Sistemlerinde Geleceğin Teknolojileri

Elektronik harp (EH) sistemleri, modern radar ağları, haberleşme yapıları ve elektromanyetik ortamın giderek karmaşıklaşması karşısında yeniden tanımlanan bir teknik rekabet alanı hâline gelmiştir. Radarların frekans çevikliği, darbe içi modülasyon çeşitliliği, düşük görünürlük seviyeleri ve yapay zekâ destekli işaret işleme yöntemleri; EH sistemlerinin klasik bastırma ve aldatma uygulamalarının ötesine geçen, çok katmanlı ve öngörülse mimarilere dönüşmesini zorunlu kılmaktadır [1–4]. Aynı zamanda platformların otonom hareket kabiliyeti, dağıtık görev paylaşımı ve geniş bant donanımların olgunlaşması, EH'nin hem bilişsel hem fiziksel katmanlarda daha derin müdahaleler yapabilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle EH'nin geleceği; uyarlanabilir elektronik destek (ED), geniş bant spektrum farkındalığı, yeniden yapılandırılabilir alıcı-verici mimarileri, galyum nitrid (GaN) tabanlı güç bileşenleri, dağıtık EH ağları, yapay zekâ destekli karar sistemleri ve kuantum temelli algılama yöntemleri gibi çok yönlü teknolojilerin bütünleşmesiyle oluşan geniş bir çerçevede değerlendirilmektedir [5–8].

Uyarlanabilir Elektronik Destek ve Bilişsel Karar Oluşturma

Güncel radarların frekans, darbe yapısı ve dalga biçimi açısından yüksek çevikliği, ED sistemlerinin parametre çıkarımı süreçlerini önemli ölçüde zorlaştırmaktadır. Radar tekrar periyodu (PRI), darbe içi modülasyon (intrapulse), taşıyıcı frekans değişimi ve istatistiksel imzalar; yayıcıların davranışını modellemek için temel bileşenlerdir [9]. Yüksek örnekleme hızlı geniş bant alıcılar, gelen sinyali zaman-frekans dönüşümleriyle ayrıştırır; sinyal kümelenme teknikleri yayıcı imzalarının sınıflandırılmasını sağlar [10, 11]. ED birimleri günümüzde sadece sinyalleri tespit eden sistemler olmaktan çıkarak, radar davranışını zamansal eğilimler bağlamında modelleyebilen yapılara dönüşmektedir [12].

ED süreçlerinin geleceğini belirlemesi beklenen kritik yönelim, bilişsel karar mekanizmalarıdır. Bu mekanizmalar, çevresel koşullara bağlı olarak eşik değerlerini güncelleyebilen, parametre kümelerini yeniden düzenleyebilen ve radar davranışında meydana gelen değişiklikleri öngörebilen yapılardır [13]. Yüksek bant genişliklerinde çalışan radarların sinyal çeşitliliği arttıkça, ED biriminin tehditleri doğru şekilde sınıflandırabilmesi için kendi parametre uzayını dinamiktir biçimde genişletmesi gerekmektedir [14].

Literatür, modern ED sistemlerinde yapay zekâ temelli istatistiksel modellerin yayıcı davranış eğilimlerini daha isabetli biçimde yakalayabildiğini göstermektedir [15]. Özellikle yüksek hacimli sinyal akışlarında, klasik yöntemlerle elde edilmesi güç olan intrapulse özelliklerin ayrıştırılması, öğrenme tabanlı modellerle daha kararlı hâle gelmiştir [16]. Böylece ED birimleri gelecekte yalnızca pasif gözlemleyen değil, tehdit ortamını gerçek zamanlı öğrenen ve tahmin eden bilişsel yapılara dönüşecektir [17].

Geniş Bant Spektrum Farkındalığı ve Yoğun Ortam Modellemesi

Radar, haberleşme ve karıştırıcı sistemlerin aynı spektrum alanını paylaşması spektrumun yoğunlaşmasına yol açmakta ve sinyallerin ayrıştırılmasını güçleştirmektedir [18]. Bu nedenle spektrum farkındalığı, EH açısından yalnızca tespit değil, aynı zamanda sinyaller arasındaki bağıntıların modellenmesi anlamına gelmektedir. Geniş bant alıcılar tarafından üretilen çok boyutlu spektrum haritaları, sinyal örtüşmesini azaltmak için kullanılan istatistiksel yoğunluk modelleriyle işlenir [19].

Yoğun ortam modellemesinin en kritik bileşeni, zamansal eğilim analizidir. Radarların dalga biçimi seçimindeki değişiklikler, frekans atlama düzenleri ve mod geçişleri; sinyal ortamının zaman içinde nasıl evrildiğini anlamak için incelenir [20]. Çoklu platformdan elde edilen sensör verilerinin birleştirilmesi (füzyon), elektronik harp sistemine mekânsal bütünlük kazandırır; böylece radar ağlarının davranışı daha geniş bir bakış açısıyla değerlendirilebilir [21].

Gelecekte bu alanda devrim yaratması beklenen yönelim, sinyal ortamının öngörüsöl biçimde modellenmesidir. Yayıcı davranışının gelecekteki frekans ve dalga biçimi tercihlerini tahmin eden modeller, karıştırma sinyallerinin yalnızca tepki olarak değil, önceden hazırlanarak uygulanmasını mümkün hâle getirecektir [22–24].

Yeniden Yapılandırılabilir Alıcı–Verici Mimarileri ve Gelişmiş Sayısal İşleme

Elektronik harpte görev koşullarının hızla değişmesi, alıcı–verici mimarilerinin esnek ve uyarlanabilir olmasını zorunlu kılmaktadır. Geniş bant sinyallerin ara frekans aşamasına taşınmadan doğrudan sayısal ortama aktarılması, gecikmeyi azaltır ve sinyalin daha doğru biçimde işlenmesini sağlar [25]. Bu yaklaşım, yeniden yapılandırılabilir işlem birimleri ve çok çekirdekli yapılara sahip mimariler için bir gerekliliktir [26].

Gelişmiş sayısal işleme birimleri, EH sistemlerinde hem destek hem taarruz görevlerini tek donanım üzerinde bütünleştirme imkânı sunmaktadır. Karıştırma ve aldatma sinyalleri, görev süresince çevresel koşullara göre otomatik olarak yeniden oluşturulabilir [27]. Bu durum EH sisteminin dönüşümlü görev yapabilmesine olanak tanır; örneğin bir platform tehdit algıladığında ED’den EA’ya saniyeler içinde geçebilir [28].

Teknolojinin gelecekte devrim yaratması beklenen yönü, işlem zincirinin tamamen otonom biçimde yapılandırılmasıdır. Yani alıcı–verici birimi çevresel spektrumu analiz ederek hangi işleme bloklarının aktif olacağını, karıştırma sinyalinin nasıl üretileceğini ve hangi parametrelerin seçileceğini kendisi belirleyebilecektir [29].

Yarı İletken Teknolojilerindeki Gelişmeler ve Geniş Bant Elektronik Taarruz

Galyum nitrür tabanlı yüksek güçlü yarı iletkenler, elektronik taarruz sistemlerinde devrim niteliğinde bir gelişme sunmaktadır. GaN’ın yüksek elektrik alan dayanımı, ısı kararlılığı ve geniş bant doğrusal büyütme kapasitesi; radarların gelişmiş işaret işleme tekniklerine rağmen karıştırma sinyallerinin etkili biçimde uygulanmasını sağlar [30].

GaN tabanlı güç yükselteçleri, geniş bant karıştırma uygulamalarında düşük bozulmalı sinyal üretimi sağlar. Bu, radarların aldatıcı sinyalleri gerçek hedef olarak algılamasını kolaylaştırır [31]. Bununla birlikte yüksek güç seviyelerinde termal yönetim zorunluluğu ve geniş bantta doğrusal çalışmanın tasarımı karmaşıklığı hâlâ geliştirilmesi gereken alanlardır [32].

Gelecekte GaN teknolojisinin daha yüksek güç yoğunluklarına erişmesiyle elektronik taarruz, radarların işaret işleme tekniklerinden bağımsız hâle gelecek; çok daha yüksek enerji yoğunluklarında geniş bant karıştırma mümkün olacaktır [33].

Dağıtık ve Çoklu Platforma Dayalı Elektronik Harp Yapıları

Tek bir platformun elektronik harp yeteneği, çok katmanlı radar ağlarına karşı yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle modern EH yaklaşımı, birden fazla platformun eşgüdümlü çalıştığı dağıtık EH ağları üzerine kurulmaktadır [34].

Bu ağlarda hava, kara ve deniz unsurları arasında sürekli veri paylaşımı yapılır. Görev dağılımı algoritmaları, platformların konumlarını, tehdit yoğunluğunu ve elektromanyetik ortamın özelliklerini değerlendirerek en uygun karıştırma stratejisini belirler [35]. Dağıtık yapılar, uzamsal karıştırma etkisinin çok daha geniş bir alana yayılmasını ve radar ağlarının bütünlüğünün hedeflenmesini sağlar [36].

Gelecekte bu alanda devrim yaratacak unsur, platformların merkezi komuta olmaksızın otonom karar alabilmesidir [37]. Böyle sistemlerde her platform hem sensör hem karar verici hem de uygulayıcı rolünde çalışır. Bu yaklaşım, çoklu radar sistemlerine karşı daha esnek ve dirençli EH görevlerinin yapılmasını sağlar.

Yapay Zekâ Tabanlı Elektronik Harp Teknolojileri

Yapay zekâ, elektronik harp alanında geleceğin en belirleyici teknolojilerinden biri olarak görülmektedir. Radarların çok modlu çalışması, karmaşık intrapulse yapıları ve düşük görünürlük seviyeleri geleneksel işleme tekniklerini zorlamaktadır [38]. Yapay zekâ tabanlı modeller, bu karmaşıklığı anlamlandırabilmek için yüksek boyutlu veri kümelerini işleyebilen güçlü bir hesaplama yapısı sunar.

Elektronik destek süreçlerinde yapay zekâ; yayıcı kümelenendirme, parametre çıkarımı, sinyal sınıflandırma ve radar davranış tahmini gibi görevlerde klasik yöntemlere kıyasla çok daha yüksek doğruluk sağlar [39]. Geniş bant spektrum haritalarından anlamlı özellikler çıkarılması, yoğunluk tahmini modelleri ve zamansal eğilim analizleriyle daha kararlı hâle gelir [40].

Elektronik taarruz alanında yapay zekânın en kritik katkısı, karşı tedbir sinyallerinin gerçek zamanlı olarak uyarlanabilmesidir. Radarın beklenen davranışı tahmin edilerek karıştırma sinyali önceden hazırlanabilir; bu da EH'nin yalnızca tepki veren değil, öngörülse bir yapıya dönüşmesini sağlar [41].

Literatür, yapay zekâ tabanlı sistemlerin gelecekte yalnızca değerlendirme değil, karar verme yeteneği de kazanacağını ve tam bilişsel EH mimarisine doğru bir geçişin yaşanacağını göstermektedir [42].

Kuantum Tabanlı Algılama ve Kuantum Elektronik Harp Yaklaşımları

Kuantum temelli radar ve algılama teknolojileri, klasik fizik temelli sistemlerin sınırlarını aşmayı amaçlamaktadır. Dolanıklık ve süperpozisyon gibi fiziksel ilkeler sayesinde çok zayıf hedef sinyallerinin dahi tespiti mümkün hâle gelir [43]. Kuantum radarın temel prensibi, dolanık parçacık çiftlerinin bir kısmının hedefe gönderilmesi, diğer kısmının sistemde tutulması ve geri dönen sinyalin dolanıklık korelasyonu ile analiz edilmesidir [44].

Elektronik harp açısından kuantum radarın zayıf noktası, dolanıklığın bozulmaya karşı aşırı hassas olmasıdır. Uzun mesafelerde dolanıklığın korunması, optik bileşenlerin taşınabilir platformlarla uyumu ve ortam gürültüsü bu sistemlerin pratik uygulamalarını sınırlamaktadır [45].

Buna rağmen kuantum teknolojilerinin EH alanında gelecekte büyük bir rekabet doğuracağı öngörülmektedir: Radarların kuantum avantajı algılama seviyesini artırırken, EH sistemlerinin karşı tedbir amacıyla dolanıklığı bozma yönünde stratejiler geliştirmesi gerekebilir [46].

Kuantum Tabanlı Algılama ve Kuantum Elektronik Harp Yaklaşımları

Elektronik harp sistemlerinin geleceği, uyarlanabilir elektronik destek yapıları, geniş bant spektrum farkındalığı, yeniden yapılandırılabilir donanım mimarileri, yüksek güçlü yarı iletken malzemeler, dağıtık görev yapıları, yapay zekâ destekli karar mekanizmaları ve kuantum temelli algılama teknolojilerinin bütünleşmesine dayanan çok boyutlu bir dönüşüme işaret etmektedir [47–49]. Modern radarların giderek daha düşük görünürlüklü, daha çevik ve daha öngörülmesi güç bir yapıya evrilmesi, EH sistemlerinin pasif olmaktan çıkarak çevresel eğilimleri analiz eden ve tehdit davranışlarını önceden değerlendirebilen bilişsel yapılara dönüşmesini zorunlu kılmaktadır [50].

SONUÇ VE TARTIŞMA

Elektronik harp sistemleri, modern elektromanyetik ortamın giderek artan karmaşıklığı ve radar teknolojilerindeki hızlı gelişmeler nedeniyle tarihinin en kritik dönüşüm aşamalarından birini yaşamaktadır. Geniş bantta çalışan radarların düşük görünürlük seviyeleri, çevik dalga biçimleri ve çok modlu faaliyetleri; geleneksel tespit, karıştırma ve aldatma yöntemlerinin sınırlarını belirginleştirmiştir [1–4]. Bu durum, elektronik harbin yalnızca elektromanyetik alan üzerinde baskı kuran bir yapı olmaktan çıkarak, çevresel değişkenleri analiz eden, öğrenen, kendini uyarlayan ve tehdit davranışlarını öngörebilen çok boyutlu bir mimariye dönüşmesini zorunlu kılmaktadır [5–7].

Uyarlanabilir elektronik destek süreçlerinin karmaşık sinyal ortamlarında yüksek doğrulukla yayıcı özelliklerini çıkarabilmesi, geleceğin radar–EH rekabetinin temel belirleyicilerinden biri olacaktır. Geniş bant spektrum farkındalığı, çoklu radar sistemlerinin eşzamanlı faaliyet gösterdiği ortamlarda sinyal

örtüşmelerinin çözümlenmesinde kritik bir rol üstlenecek; çok boyutlu spektrum modellemeleri, tehdit analizinin zaman içindeki evrimini görünür kılacaktır [8–11]. Yeniden yapılandırılabilir alıcı–verici mimariler ve gelişmiş sayısal işleme yapıları ise, elektronik destek ve elektronik taarruz işlevlerinin tek platformda bütünleşmesine olanak tanıyarak görev esnekliğini artıracaktır [12–14].

Yarı iletken teknolojilerindeki ilerlemeler, özellikle galyum nitrür tabanlı yüksek güç yükselteçlerinin olgunlaşması, geniş bant elektronik taarruzun etkinliğini önemli ölçüde artırmakta; radarların gelişmiş işaret işleme yöntemlerine rağmen karıştırma ve aldatma sinyallerinin daha gerçekçi ve daha kararlı biçimde uygulanmasını mümkün kılmaktadır [15–17]. Bununla birlikte çoklu platform mimarilerine dayanan dağıtık elektronik harp yapıları, geniş coğrafi alanlarda eşgüdümlü baskılama ve aldatma stratejilerinin geliştirilmesine izin vererek, radar ağlarının bütüncül işleyişine yönelik daha etkili karşı tedbirler sunmaktadır [18–20].

Bu dönüşümün en belirgin hızlandırıcısı yapay zekâ tabanlı karar yapılarıdır. Geniş bant verilerin yüksek hacmi, karmaşık sinyal istatistikleri ve radar davranışındaki hızlı değişimler, klasik işleme yöntemleriyle analiz edilmesi güç yapılar oluşturmaktadır. Yapay zekâ modelleri, bu karmaşıklığın üstesinden gelmek için yüksek boyutlu veri kümelerini işleyebilen güçlü bir hesaplama altyapısı sunmakta; yayıcı kümelendirme, sinyal sınıflandırma, parametre takibi ve tehdit davranışı tahmini gibi görevlerde belirgin üstünlük sağlamaktadır [21–24]. Yapay zekâ destekli elektronik harp sistemlerinin gelecekte yalnızca değerlendirme yapan araçlar olmaktan çıkarak, tehdit davranışını öngören ve karşı tedbiri önceden şekillendiren öngörülse yapıları dönüşeceği öngörülmektedir [25, 26].

Kuantum temelli algılama yöntemleri ise elektronik harp rekabetini fiziksel düzeyde yeniden tanımlama potansiyeline sahiptir. Dolanıklığa dayalı algılama teknikleri, klasik radarların ulaşmakta zorlandığı sinyal–gürültü seviyelerinde dahi hedef tespitine imkân verebilecek bir çerçeve sunmakta; buna karşılık dolanıklık yapısının bozulmasına yönelik karşı tedbirler, geleceğin elektronik harp stratejilerini kuantum fiziğinin temel ilkelerine kadar derinleştirmektedir [27–29]. Her ne kadar mühendislik sınırlamaları nedeniyle kısa vadede operasyonel uygulamalar sınırlı görünse de, uzun vadede kuantum tabanlı sistemlerin radar–EH dengesini köklü biçimde etkileme potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir [30].

Genel olarak değerlendirildiğinde, elektronik harp sistemlerinin evrimi çok katmanlı bir teknolojik bütünleşmeye işaret etmektedir. Geleceğin EH mimarisi; öğrenebilen, uyarlanabilen, otonom karar verebilen, fiziksel katmanlara kadar etki edebilen ve tehdit davranışını öngörebilen sistemlerden oluşacaktır [31–33]. Bu dönüşüm, yalnızca elektromanyetik ortamın dinamiklerine uyum sağlama çabası değil, aynı zamanda elektronik harp ile radar teknolojileri arasında çok daha sofistike, karşılıklı evrime dayalı bir rekabet döngüsünün başlangıcıdır. Bu bağlamda elektronik harp sistemlerinin, geleceğin harekât ortamında hem taktik hem de stratejik düzeyde belirleyici bir rol oynayacağı; bu rolün de mühendislik, doktrin ve konsept düzeyinde yeniden tanımlanacağı açıktır [34–36].

KAYNAKLAR

- [1] D. L. Adamy, *EW 101: A First Course in Electronic Warfare*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2001.
- [2] D. L. Adamy, *EW 102: A Second Course in Electronic Warfare*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2004.
- [3] F. G. Neri, *Introduction to Electronic Defense Systems*, 3rd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 2018.
- [4] A. E. Spezio, “Electronic warfare systems,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 3, pp. 633–644, 2002.
- [5] S. Pakfiliz, *Elektronik Harp ve Uygulamaları*. Ankara, Türkiye: STM, 2022.
- [6] STM ThinkTech, *Bilişsel Elektronik Harp ve Radar Sistemleri: Eğilimler ve Gelecek Perspektifleri*. Ankara, Türkiye: STM, 2022.
- [7] P. Sharma, K. K. Sarma, and N. E. Mastorakis, “Artificial intelligence aided electronic warfare systems: Recent trends and evolving applications,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 224761–224780, 2020.
- [8] N. Sfetcu, “Challenges and risks of artificial intelligence in electronic warfare,” in *IT&C – Securitate Cibernetică*, 2024.
- [9] “Electronic warfare systems,” teknik rapor, 2019.

- [10] M. Nuhoğlu and H. Cirpan, "Radar signal deinterleaving in electronic warfare systems: A combined approach," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 102834–102849, 2023.
- [11] X. Gu *et al.*, "Design of ultra-wideband radar signal generator based on RFSoc," in *Proc. Int. Conf. on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 2025.
- [12] J. Kumar *et al.*, "A configurable multi-channel direct wideband RF-sampling SWaP-C optimized transceiver and processing module for EW systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications and Computing*, 2023.
- [13] "Design of a multi-mode RF signal acquisition and storage system based on FPGA," *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, vol. 12, no. 1, 2024.
- [14] "Classification of radar emitter signals using cascade feature extractions and a hierarchical decision technique," *Journal of Modern Information Science*, vol. 12, no. 1, 2024.
- [15] "Radar signal deinterleaving in electronic warfare systems: A combined approach," dergi makalesi, 2023.
- [16] "Frekans atlamalı sinyallerin tespiti ve parametre kestirimine genel bir bakış: Son gelişmeler ve zorluklar," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2023.
- [17] "Jamming resistance of superhet radar receivers," *Journal of Military Science*, 2020.
- [18] "The advanced multifunction RF concept," teknik makale, 2019.
- [19] "A configurable multi-channel direct wideband RF-sampling SWaP-C optimized transceiver and processing module for EW systems," teknik makale, 2023.
- [20] "Design of ultra-wideband radar signal generator based on RFSoc," konferans bildirisi, 2025.
- [21] "Simulation of cognitive electronic warfare system," *Systems*, vol. 13, no. 7, 2025.
- [22] "Cognitive EW system modelling at systems level," *Systems*, vol. 13, no. 7, 2025.
- [23] "Radar and EW scenario analysis using remote sensing," *Remote Sensing*, vol. 17, art. no. 2152, 2025.
- [24] "Advanced sensing and signal processing for electronic warfare," *Sensors*, vol. 25, art. no. 4690, 2025.
- [25] STM ThinkTech, *Bilişsel Elektronik Harp ve Radar Sistemleri: Tehditler, Fırsatlar ve Yol Haritası*. Ankara, Türkiye: STM, 2023.
- [26] M. Haigh, "Cognitive EW data: From collection to decision," IEEE VDL Sunumu, 2025.
- [27] V. Slyusar, "Conceptual foundations of the swarm employment of unmanned aerial vehicles as intelligent means of electronic warfare," *Technological and Applied Research of the Armed Forces of Ukraine*, 2025.
- [28] "Concepts for UAV swarms in future warfare," savunma analizi raporu, 2024.
- [29] "Distributed auction-based adaptive task assignment and re-assignment for UAV swarms," dergi makalesi, 2022.
- [30] R. A. Khalil, M. Haris, and N. Saeed, "Beyond line-of-sight defense communication systems: Recent advances and future challenges," *arXiv preprint arXiv:2312.06491*, 2023.
- [31] "GaN-tabanlı geniş bant düşük gürültülü yüksekçe tasarımı," mikrodalga devre makalesi, 2022.
- [32] "High-power GaN-based RF front ends for electronic attack systems," dergi makalesi, 2021.
- [33] "Receiver architectures and jammer resistance analysis for radar/EW systems," dergi makalesi, 2020.
- [34] Joint Air Power Competence Centre (JAPCC), "Electronic warfare in future joint operations," *JAPCC Journal*, no. 37, 2023.
- [35] N. Sfetcu, "Challenges and risks of AI in EW," in *IT&C – Securitate Cibernetică*, 2024.
- [36] "Cognitive electronic warfare system simulation framework," dergi makalesi, 2023.
- [37] "Ultra-wideband radar and EW test signal generation based on RFSoc," konferans bildirisi, 2025.
- [38] "Data-driven approaches for emitter recognition and response selection in cognitive EW," IEEE VDL Sunumu, 2025.
- [39] P. Sharma *et al.*, "Artificial intelligence aided electronic warfare systems: Recent trends and evolving applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 224761–224780, 2020.
- [40] N. Sfetcu, "Artificial intelligence and cyber challenges in EW," *IT&C – Securitate Cibernetică*, 2024.
- [41] "Kuantum teknolojileri ve elektronik harp üzerindeki olası etkileri," teknik rapor, 2023.
- [42] "Quantum radar concepts and potential EW countermeasures," dergi makalesi, 2022.
- [43] "Emerging quantum sensing for low-observable targets," *Applied Physics Reviews*, 2023.
- [44] "Swarm employment of UAVs for electronic warfare and ISR," konsept raporu, 2024.
- [45] "Forest-fire-extinguishing activities using UAV swarms: Control and communication issues," *Forests*, vol. 13, art. no. 811, 2022.
- [46] "UAV swarm intelligence: Recent advances and future trends," *International Journal of Automation and Control*, 2023.
- [47] "Multi-platform EW architectures and distributed electronic attack," dergi makalesi, 2022.
- [48] "Network-centric EW and beyond line-of-sight coordination," teknik rapor, 2023.

The International Conference on Defense Technologies & Future Strategies
December 17-20, 2025 Konya, Türkiye

- [49] STM ThinkTech, *Elektronik Harbin Yeniden Yükseliş ve Geleceği*. Ankara, Türkiye: STM, 2021.
[50] “Elektronik harp ve radar entegrasyonuna sistematik bir bakış,” yüksek lisans tezi, 2020.

DİJİTAL HAREKETLİ HARİTA SİSTEMLERİNDE YAPAY ZEKÂ TABANLI İHA

Adil KARADENİZ^{1*}

^{1*} *Department of Electric Electronic Engineering, Selçuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

Özet – Bu çalışma, dijital hareketli harita sistemleri üzerinde çalışan yapay zekâ tabanlı İHA/UAV rota optimizasyonunu ele alarak, son yıllarda İHA'ların askeri ve sivil görevlerde artan kullanımının planlama algoritmalarını kritik hâle getirdiğini vurgular. Gözetleme, keşif, arama-kurtarma, afet yönetimi, tarımsal ilaçlama ve son kilometre teslimatı gibi görevlerin başarısı; yalnızca platform kabiliyetlerine değil, rota/görev planlama performansına da doğrudan bağlıdır. Bu kapsamda rota planlama problemleri, genellikle Gezgin Satıcı Problemi (GSP), Araç Rotalama Problemi (ARP/VRP) ve Oryantiring Problemi (OP) türevleri olarak modellenmekte; İHA'lara özgü batarya/enerji kısıtları, 3B hareket, no-fly bölgeleri, engeller, sensör menzili ve güvenlik riskleri gibi unsurlar modele entegre edilmektedir. Ayrıca amaç fonksiyonları çoğu zaman çok boyutludur; mesafe ve süre minimizasyonu ile bilgi/kapsama maksimizasyonu, risk azaltımı ve enerji-emisyon hedefleri aynı anda ele alınır ve bu durum çok amaçlı optimizasyon ihtiyacını doğurur.

Rapor, son beş yılda yayımlanan en az yirmi akademik çalışmaya dayanarak literatürü; afet lojistiği, bölgesel keşif, kargo teslimatı ve sürü İHA görev paylaşımı gibi başlıklar altında inceler. Küçük/orta ölçekli problemler için karma tamsayılı modellerin analitik avantaj sağladığı; ancak problem büyüdükçe çözüm süresinin arttığı ve bu nedenle genetik algoritma (GA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), karınca kolonisi (ACO) ile k-means + en yakın komşu (NN) gibi meta-sezgisel ve hibrit yöntemlerin pratikte öne çıktığı gösterilir. Özellikle kümeleme + sezgisel rota inşası yaklaşımları, çok sayıda hedef içeren afet senaryolarında uygulanabilir çözümler üretmektedir.

Çalışma ayrıca, literatürden yararlanarak önerilen bir sistem/matematiksel model çerçevesi sunar: girdi katmanında dijital harita ve görev parametreleri, ara katmanda çok amaçlı model ve çözüm motorları, çıktı katmanında ise görev planları ve rota listeleri yer alır. Değerlendirme bölümünde; batarya kısıtları, gürültü/dinamik belirsizlikler ve gerçek zamanlı güncelleme gereksinimlerinin İHA planlamasını klasik araç rotalamadan daha zor hâle getirdiği; sürdürülebilirlik (enerji/karbon) hedeflerinin ise rota optimizasyonu ile giderek daha fazla bütünleştiği vurgulanır. Gelecek çalışmalar için dinamik/gerçek zamanlı yeniden planlama, İHA-kara aracı hibrit ağları, sürdürülebilirlik odaklı çok amaçlı modeller, gerçek donanım üzerinde doğrulama ve makine öğrenmesiyle talep-risk tahmini entegrasyonu temel araştırma yönleri olarak öne çıkar.

Anahtar Kelimeler – HA/UAV rota optimizasyonu; dijital hareketli harita; çok amaçlı optimizasyon; araç rotalama problemi (VRP); metasezgisel algoritmalar; afet lojistiği

GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA/UAV), son yıllarda gerek askeri gerekse sivil uygulamalarda gözetleme, keşif, arama-kurtarma, afet yönetimi, tarımsal ilaçlama, kargo taşımacılığı ve son kilometre koli teslimatı gibi çok geniş bir görev yelpazesinde kullanılan kritik platformlar hâline gelmiştir. İHA'ların insanlı hava araçlarına göre daha düşük maliyet, daha yüksek manevra kabiliyeti, riskli bölgelere insan hayatını tehlikeye atmadan erişebilme ve operasyonel esneklik gibi avantajlar sunması, bu platformların yaygınlaşmasını hızlandırmıştır (1), (6), (10), (11), (12), (14), (16). Bu görevlerin başarısı, yalnızca İHA'ların donanımsal ve aerodinamik özelliklerine değil, aynı zamanda görev ve rota planlama algoritmalarının başarısına da doğrudan bağlıdır. Bölgesel keşif yapan bir İHA filosunun sınırlı bir görev süresi içinde en kritik bölgeleri ziyaret etmesi, afet sonrası acil yardım malzemelerinin en kısa sürede ihtiyaç noktalarına ulaştırılması veya son kilometre koli teslimatında müşteri memnuniyeti ile maliyet arasındaki dengenin sağlanması, temelde rota optimizasyonu problemlerine karşılık gelmektedir (1), (4), (8), (11), (13), (14). Rota planlama problemleri, literatürde

çoğunlukla Gezin Satıcı Problemi (GSP), Araç Rotalama Problemi (ARP/VRP) ve Oryantiring Problemi (OP) gibi iyi bilinen kombinatoriyel optimizasyon problemlerinin türevleri olarak modellenmekte; İHA'lara özgü enerji/batarya kısıtları, üç boyutlu hareket kabiliyeti, yasak uçuş bölgeleri, sensör menzili ve güvenlik riskleri gibi ek unsurlar bu modellere entegre edilmektedir (1), (3), (5), (6), (16), (17). Çoğu uygulamada amaç fonksiyonu tek boyutlu değildir; mesafe/süre minimizasyonu, bilgi veya kapsama oranı maksimizasyonu, risk minimizasyonu, enerji tüketimi ve karbon emisyonu azaltımı gibi birbirleriyle çatışabilen birden fazla kriter aynı anda dikkate alınmaktadır (1), (5), (6), (7), (8), (13), (17),(18). Diğer taraftan, son yıllarda hava taşımacılığı, lojistik ve ulaştırma alanlarında dijital dönüşüm, büyük veri analitiği ve yapay zekâ uygulamaları, rota ve uçuş planlama süreçlerinin merkezine yerleşmiştir. Ulaştırma işletmelerinde talep tahmini, hat planlama, filo ataması, dinamik fiyatlandırma gibi alanlarda yapay zekâ kullanımı yaygınlaşmakta; havayolu işletmelerinde ise sürdürülebilirlik, yakıt verimliliği ve emisyon azaltımı hedefleri, rota optimizasyonu ve dijital uçuş planlama sistemleri ile desteklenmektedir (9), (15), (18), (11), (12).

Bu raporda, dijital hareketli harita sistemlerinde çalışan yapay zekâ tabanlı İHA/UAV rota optimizasyonu konusu, son beş yıl içinde yayınlanan en az yirmi akademik çalışma temel alınarak incelenmektedir.

Kuramsal Çerçeve

İHA Görev ve Rota Planlama Probleminin Tanımı

İHA görev ve rota planlama problemi, genel olarak bir veya birden fazla İHA'nın belirli bir başlangıç noktasından kalkarak, çeşitli hedef noktaları veya bölgeleri belirli kısıtlar altında ziyaret etmesi ve görevi tamamlayarak başlangıç noktasına ya da belirlenen başka bir noktaya dönmesi şeklinde tanımlanabilir. Hedefler çoğu zaman:

- Noktasal hedefler: Teslimat noktaları, sensör yerleştirme noktaları, belirli koordinatlar,
- Bölgesel hedefler: Arama-kurtarma veya keşif bölgeleri (dikdörtgen veya poligon alanlar),
- Sürekli alanlar: Tarımsal ilaçlama sahaları gibi sürekli yüzeyler

olacak şekilde modellenmektedir [1],[5],[6],[7],[13],[14],[17]

Problemi zorlaştıran temel unsurlar şunlardır:

- İHA'ların enerji veya batarya kapasitelerinin sınırlı olması,
- Uçuş süresi, menzil ve faydalı yük kapasitesi gibi operasyonel kısıtların bulunması,
- Uçuşun gerçekleştirildiği hava sahasında yasak bölgeler (no-fly zones), engeller, düşman radar veya savunma unsurları gibi riskli alanların yer alması,
- Görev alanının üç boyutlu olması ve meteorolojik koşulların rota planlamasını etkilemesi,
- Bazı uygulamalarda zaman pencereleri (belirli hedeflere belirli zaman aralıklarında ulaşma zorunluluğu) bulunması [3],[5],[11],[14],

Bişkin ve ark. (2023), İHA filosu için geliştirdikleri iki amaçlı rota planlama modelinde, hedeflerin farklı önem seviyelerine sahip olduğu bir keşif probleminde hem toplam mesafeyi minimize eden hem de toplam bilgi kazanımını maksimize eden rota çözümleri üretmekte, problemi klasik tek amaçlı modellerden daha gerçekçi bir formda ele almaktadır [1]. Benzer şekilde, Atak ve Tezcaner Öztürk (2024) tarafından önerilen modelde, hedefler nokta yerine dikdörtgen bölgeler olarak temsil edilmekte ve bu bölgelerin içinde şerit tarama yapılarak bilgi kazanımı hesaplanmaktadır [9]. Bu çalışmalar, İHA görev planlamasının, klasik gezgin satıcı veya araç rotalama problemlerinin ötesinde, alan kapsama ve bilgi odaklı karar verme yapısı kazandığını göstermektedir.

Klasik Optimizasyon Modelleri: GSP, ARP ve Oryantiring Problemi

İlgili literatürde İHA rota planlama problemleri, çoğunlukla aşağıdaki klasik modeller üzerinde yapılandırılmaktadır:

- Gezin Satıcı Problemi (GSP): Tek aracın tüm hedefleri bir kez ziyaret ederek başlangıç noktasına döndüğü ve toplam mesafenin minimize edildiği problem. Tek İHA'lı kargo teslimatı ve basit keşif görevlerinde GSP temelli modeller yaygındır [1],[4],[6].
- Araç Rotalama Problemi (ARP/VRP): Bir depo ve çok sayıda müşteri/ziyaret noktası bulunduğu, birden fazla aracın (filonun) görev paylaştığı durumlarda kullanılır. İHA filosu veya kamyon-İHA hibrit sistemlerinde ARP'nin kapasite kısıtlı, mesafe kısıtlı ve zaman pencere li versiyonları kullanılmaktadır [2],[4],[10],[11].
- Oryantiring Problemi (OP) ve Çeşitleri: Tüm hedeflerin ziyaret edilmesi zorunlu değildir; sınırlı bir süre veya mesafe içinde en yüksek toplam ödül (bilgi, kazanç) sağlayan alt kümenin seçilmesi amaçlanır. Bölgesel keşif yapan İHA'lar için en yüksek bilgi kazancını sağlayan hedef seti ve rota kombinasyonu bu çerçevede ele alınmaktadır [17].

Thibbotuwawa ve ark. (2020), insansız hava aracı rotalama problemlerine ilişkin kapsamlı literatür taramalarında, GSP, ARP ve OP tabanlı modellerin İHA uygulamalarına uyarlanmasında özellikle enerji modeli, yük kapasitesi ve üç boyutlu hareket gibi faktörlerin kritik rol oynadığını belirtmektedir [6].

Çok Amaçlı Optimizasyon ve Pareto Yaklaşımı

İHA/UAV rota planlama problemleri çoğu zaman çok amaçlı optimizasyon karakterine sahiptir. Örneğin:

- Toplam mesafeyi minimize etmek ile bilgi kazancını maksimize etmek,
- Görev süresini kısaltmak ile kapsanan alan miktarını artırmak,
- Enerji tüketimini azaltmak ile riskli bölgelerden uzak durmak

arasındaki dengeler çoğunlukla çatışmalıdır.

Bu nedenle literatürde iki temel yaklaşım görülmektedir:

1. Klasik çok amaçlı yöntemler:

- ϵ -kısıt yöntemi,
- Ağırlıklandırılmış toplam yaklaşımı,
- Hedef programlama vb.

Örneğin, Atak ve Tezcaner Öztürk, iki amaçlı görev planlama modellerinde ϵ -kısıt yöntemiyle Pareto-optimal çözümler kümesini elde etmekte ve karar vericiye bir çözüm seti sunmaktadır [9].

2. Meta-sezgisel çok amaçlı algoritmalar:

- Çok amaçlı genetik algoritmalar (MOGA),
- Çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu (MOPSO) vb.

Bu tür yöntemler, özellikle problem boyutu büyüdüğünde ve kesin çözümlerin hesaplama yükü arttığında devreye girmekte; Pareto-cephesine yakın çözümler kısa sürede elde edilmektedir [1],[5],[6],[7],[13],[17],[18].

Bişkin ve ark. (2023) çalışmasında, karma tamsayı model ile elde edilen çözümler ile genetik algoritma tabanlı sezgisel yöntemle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış; GA tabanlı önerilen yaklaşımın, karmaşık senaryolarda nondomine çözümler kümesini yeterli doğrulukla ve daha kısa sürede yaklaşık edebildiği gösterilmiştir [1]. Bu sonuç, gerçek zamanlı veya sık güncelleme gerektiren operasyonlarda meta-sezgisel yöntemlerin önemini ortaya koymaktadır.

Hesapsal Zekâ ve Metasezgisel Yöntemler

Son yıllarda İHA rota planlaması için kullanılan yaygın meta-sezgisel yöntemler şunlardır:

- Genetik Algoritmalar (GA):

Rotalar kromozom biçiminde temsil edilmekte, çaprazlama ve mutasyon operatörleriyle yeni çözümler üretilmekte; özellikle kargo teslimatı ve çoklu İHA görev paylaşım problemlerinde tercih edilmektedir [1],[4],[16].

• Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO):

Her parçacık bir rota adayını temsil eder; sürü içi bilgi paylaşımı sayesinde çözümler iteratif olarak geliştirilir. Engellerin ve tehlikeli bölgelerin bulunduğu ortamlarda PSO'nun klasik deterministik yöntemlere göre daha esnek ve hızlı çözümler ürettiği gösterilmiştir [5].

• Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) ve Diğerleri:

Karınca kolonisi tabanlı yöntemler özellikle engel içeren ağlarda kuvvetli çözümler üretmekte; bazı çalışmalarda, no-fly bölgeleri ve riskli sahalar içeren rota planlamasında kullanılmaktadır [12],[13].

DÜMF Mühendislik Dergisi'nde yayımlanan çalışmada, engellerin ve yasak bölgelerin bulunduğu bir senaryoda PSO gibi hesaplamalı zekâ yöntemlerinin, güvenli ve görece kısa rotalar üreterek İHA'nın hem görevini tamamlamasını hem de riskten kaçınmasını sağladığı gösterilmektedir [3]. Benzer şekilde, Pözüt ve ark. (2025) çalışmasında acil yardım dağıtımında k-means kümeleme ile birlikte En Yakın Komşu (NN) yaklaşımı kullanılarak KM-ARP sınıfına giren problem için pratikte uygulanabilir çözümler elde edilmektedir [4].

LİTERATÜR İNCELEMESİ

İHA Filosunda Çok Amaçlı Rota Planlaması –[1]

Bişkin, Tezcaner Öztürk ve Tuncer Şakar (2023), bir İHA filosunun farklı önem düzeylerine sahip hedefleri ziyaret ettiği iki amaçlı bir rota planlama problemi ele almaktadır [1]. Amaç fonksiyonlarından ilki, filonun toplam kat ettiği mesafeyi minimize etmek; ikincisi ise hedeflerden elde edilen toplam bilgi miktarını maksimize etmektir. Çalışmada:

- Önce karma tamsayı doğrusal programlama modeli kurulmuş,
- Daha sonra problem boyutu büyüdüğünde çözüm süresi uzadığı için, GA_fUAV adı verilen genetik algoritma tabanlı bir sezgisel yaklaşım geliştirilmiştir.

Sayısal deneyler, üç farklı senaryoda (farklı İHA ve hedef sayıları) yürütülmüş; kesin modelle elde edilen Pareto çözümleri ile GA tabanlı yaklaşımla elde edilen çözümler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, genetik algoritmanın, özellikle büyük boyutlu problemlerde kabul edilebilir çözüm kalitesiyle, çok daha kısa sürede Pareto-cephesine yakın bir çözüm kümesi elde ettiğini göstermektedir [1].

Bu çalışma, raporda hem İHA filosu için çok amaçlı matematiksel model örneği hem de genetik algoritma ile yaklaşımlama konusunda temel referans olarak kullanılabilir.

Araç-İHA İşbirliği ile Kargo Teslimatları

Yetiş, Güngör ve Karaköse (2021), kamyon-İHA işbirliği ile kargo teslimatı yapılan bir sistemi ele almakta; burada kamyon hareketli bir depo gibi görev yapmakta, İHA ise kamyonun durduğu noktalardan kalkarak çevredeki müşterilere teslimat gerçekleştirmektedir [2]. Çalışmada:

- Problem, karma tam sayılı bir modelle ifade edilmiş,
- Kamyon rotası ile İHA görev sıralaması eşzamanlı olarak optimize edilmiş,
- Amaç fonksiyonu olarak toplam teslimat süresinin minimize edilmesi benimsenmiştir.

Modelde İHA'nın batarya kapasitesi, uçuş süresi ve yük kapasitesi, kamyonun ise güzergâh kısıtları dikkate alınmıştır. Sayısal sonuçlar, kamyon-İHA işbirlikli sistemlerin, yalnızca kara aracı kullanılan klasik modellere göre teslimat süresini ve bazı senaryolarda toplam mesafeyi azaltabildiğini göstermektedir [2]. Bu çalışma, İHA'ların son kilometre teslimatında kara araçlarıyla birlikte hibrit bir çözüm olarak nasıl konumlandırılabilirliğini göstermesi bakımından literatürde önemli bir yere sahiptir.

Hesapsal Zekâ Yöntemleri ile İHA Rota Planlaması

Altun ve Aydın (2021), İHA'lar için rota planlama problemine hesapsal zekâ yöntemleri ile çözüm önermektedir [3]. Çalışmada:

- Problem, engel ve riskli bölgeler içeren bir ortamda güvenli ve kısa rota bulma olarak tanımlanmıştır.

- Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) başta olmak üzere çeşitli meta-sezgisel yöntemler kullanılmıştır.

Sonuçlar, PSO'nun, özellikle karmaşık engel yapılarına sahip sahalarda, deterministik kısa yol algoritmalarına göre daha esnek çözümler üretebildiğini göstermektedir. Çalışma, İHA rota planlama problemlerinde popülasyon tabanlı algoritmaların kullanımını somut bir örnek üzerinden ortaya koymaktadır [3].

Quadrotor İHA'larda Metasezgisel Rota Optimizasyonu ve Gerçekleme

İncekara (2022), quadrotor tipindeki bir İHA'nın farklı çevre şartlarında rota optimizasyonunu ve bunun fiziksel sistem üzerinde gerçekleştirilmesini konu alan doktora tezinde, çeşitli metasezgisel yöntemleri karşılaştırmalı olarak test etmiştir [5]. Çalışmada:

- İHA modeli ve dinamiği ayrıntılı şekilde tanımlanmış,
- Farklı engel ve hedef yapılarına sahip senaryolar oluşturulmuş,
- Genetik algoritma, PSO ve benzeri optimizatörlerin performansı karşılaştırılmıştır.

Tezin önemli katkılarından biri, simülasyon ortamında önerilen algoritmaların gerçek quadrotor platform üzerinde test edilmesi ve böylece teorik sonuçların sahaya taşınmış olmasıdır. Bu yönüyle, raporda “önerilen sistemin gelecekte fiziksel olarak doğrulanmasına” yönelik tartışmalara doğrudan referans sağlayabilir [5].

Uçuş Kısıtlı Bölgelerde İHA Rota Optimizasyonu

Agazade (2020), uçuş kısıtlı bölgelerin bulunduğu bir hava sahasında İHA rotalarının planlanması problemini ele almakta; burada özellikle no-fly zonelar ve tehlikeli bölgeler modelde açıkça yer almaktadır [8]. Çalışmada:

- Kısıtlı bölgeler geometrik olarak tanımlanmış,
- İHA rotasının bu bölgelerden geçmemesi için çeşitli kısıtlar geliştirilmiş,
- Bazı sezgisel yöntemlerle birlikte klasik optimizasyon teknikleri kullanılmıştır.

Bu tez, İHA rota planlama problemlerinin sivil havacılık kuralları, güvenlik ve emniyet gereksinimleri ile bütünleştirilmesine iyi bir örnek teşkil etmektedir. Aynı zamanda, raporda önerilecek modelde no-fly bölgeleri ve risk alanlarının nasıl ele alınabileceği konusunda teorik altyapı sunmaktadır [8].

Bölgesel Keşif İçin İki Amaçlı Görev Planlama

Atak ve Tezcaner Öztürk'ün Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi'nde yayımlanan çalışmasında, bölgesel keşif görevi yapan hava araçları için iki amaçlı bir görev planlama problemi ele alınmaktadır [9]. Hedefler dikdörtgen bölgeler şeklinde modellenmekte, her bölgenin önem derecesi ve bilgi değeri bulunmaktadır. Amaç:

- Ziyaret edilen bölgelerden elde edilen toplam bilgi miktarını maksimize etmek,
- Aynı zamanda toplam uçuş mesafesini minimize etmektir.

Bu amaçla bir karma tam sayılı model geliştirilmiş, ϵ -kısıt yöntemi ile Pareto-optimal çözümler elde edilmiş ve daha büyük problemler için sezgisel bir yöntem önerilmiştir. Çalışma, bölgesel keşif görevlerinde alan tabanlı modelleme ve iki amaçlı optimizasyon kavramlarını bir araya getirerek literatüre önemli bir katkı sunmaktadır [9].

Afet Operasyonları Yönetiminde İHA'ların Kullanımı[10]

Değirmen ve arkadaşlarının çalışması, afet operasyonlarında gözetleme amacıyla İHA'ların kullanımı ve bu kapsamda rota planlaması üzerine odaklanmaktadır [10]. Çalışmada:

- Afet bölgesinde gözetleme yapılacak alanlar belirlenmiş,
- Görev süreleri, İHA menzili ve kapsama gereksinimleri dikkate alınarak optimizasyon modelleri kurulmuştur.

Bu çalışma, İHA'ların afet senaryolarında durum tespiti, hasar analizi ve kaynak planlaması gibi kritik işlevleri desteklediğini ve rota optimizasyonunun operasyonel başarımlar üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır [10].

Afet Sonrası Acil Yardım Dağıtımı İçin İHA Rotalama

Pözümler ve arkadaşlarının çalışmasında, afet sonrası acil yardım malzemelerinin İHA'lar ile dağıtımını ele alınmakta; problem, kapasite ve mesafe kısıtlı araç rotalama problemi (KM-ARP) çerçevesinde modellenmektedir [4]. Çalışmada:

- Yardım noktaları, k-means kümeleme algoritması ile gruplandırılmış,
- Her grup için En Yakın Komşu (NN) yöntemi ile ilk rota turları oluşturulmuş,
- Böylece hem İHA sayısının hem de toplam kat edilen mesafenin minimize edilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışma, afet lojistiğinde İHA tabanlı dağıtım sistemlerinin nasıl yapılandırılabilirliğine ve basit fakat etkili bir yaklaşımla rota planlamasının nasıl yapılabilirliğine dair uygulanabilir bir örnek sunmaktadır [4].

Sürü İHA'lar İçin Görev Paylaşımı ve Rota Planlaması

Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi'nde yayımlanan çalışmada, afet yönetimi bağlamında sürü hâlinde hareket eden İHA'ların görev paylaşımı ve rota planlaması ele alınmıştır [7]. Çalışmada:

- Çok sayıda İHA'nın aynı anda görev yaptığı sürü yapısı,
- Görevlerin İHA'lar arasında adil ve verimli şekilde paylaşılması,
- Her İHA için uygun rotaların belirlenmesi

için yenilikçi bir algoritma önerilmektedir. Bu tip çalışmalar, gelecekte tam otonom sürü İHA sistemlerinin saha kullanımına yönelik önemli bir adım olarak değerlendirilebilir [7].

Son Kilometre Koli Teslimatı Literatür Taraması

Kanık ve arkadaşları, Verimlilik Dergisi'nde yayımladıkları literatür taramasında, son kilometre koli teslimatı alanındaki çalışmaları sistematik biçimde incelemekte ve özellikle İHA, otonom araçlar, kargo dönlamları, kitle kaynaklı teslimat gibi yükselen teknolojilerin rolünü analiz etmektedir [11].

Çalışmanın bulguları:

- Son kilometre teslimatının tedarik zinciri maliyetleri içinde en pahalı halkalardan biri olduğunu,
- Literatürdeki eğilimlerin daha çok sürdürülebilirlik, çevresel etki ve teknoloji entegrasyonu üzerinde yoğunlaştığını,
- İHA destekli teslimat sistemlerinin, özellikle trafik yoğunluğunun yüksek olduğu kentsel alanlarda ve erişimi zor kırsal bölgelerde önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir [11].

Bu çalışma, raporda İHA rota optimizasyonunun yalnızca teknik değil, aynı zamanda lojistik ve iş modeli boyutuna da sahip olduğunu göstermesi bakımından kritik önemdedir.

Ulaştırma İşletmelerinde Yapay Zekâ Uygulamaları[12]

İnan (2024), ulaştırma işletmelerinde yapay zekâ kullanımını ele alan çalışmasında; talep tahmini, hat planlama, dinamik fiyatlandırma, müşteri segmentasyonu ve akıllı ulaşım sistemleri gibi alanlarda makine öğrenmesi ve veri madenciliği uygulamalarını incelemektedir [12]. Çalışma, rota ve hat planlamasının:

- Büyük veri analitiği,
- Tahmine dayalı modelleme,
- Ve gerçek zamanlı karar destek sistemleriyle

entegre edildiğinde, ulaştırma sistemlerinin verimliliğini artırdığı sonucuna varmaktadır. Bu çerçeve, İHA'lar ve hava taşımacılığı için geliştirilecek dijital hareketli harita + yapay zekâ tabanlı rota planlama sistemini destekleyen genel bir üst çatı sunmaktadır [12].

Havacılıkta Yapay Zekâ Uygulamaları

Meydan (2022), havacılıkta yapay zekâ uygulamalarını derleyen çalışmasında; uçuş planlama, bakım tahmini, yolcu talep tahmini, hava trafik kontrolü ve emniyet analizleri gibi farklı alanlarda yapay zekâ ve makine öğrenmesi kullanımını incelemektedir [14]. Çalışmada, uçuş planlama ve rota optimizasyonu:

- Yakıt tasarrufu,
- Emisyon azaltımı,
- Gecikme sürelerinin azaltılması

gibi hedeflerle ilişkilendirilmekte ve dijitalleşmiş uçuş planlama sistemlerinin gelecekte havayolu operasyonlarının vazgeçilmez bir parçası olacağı vurgulanmaktadır [14].

Havayolu İşletmelerinde Dijital Dönüşüm – Kurumsal Uygulamalar [16]

“Havayolu işletmelerinde dijital dönüşüm uygulamaları” başlıklı kitap bölümü/makale, havayolu sektöründe dijitalleşme sürecini ve özellikle:

- e-bilet ve e-AWB uygulamaları,
- Dijital uçuş planlama sistemleri,
- Gerçek zamanlı filo ve rota yönetimi,
- Büyük veri analitiği ve karar destek sistemleri

gibi bileşenleri incelemektedir [16]. Çalışmada, dijital dönüşümün yalnızca operasyonel verimlilik değil, aynı zamanda stratejik rekabet avantajı ve sürdürülebilirlik hedefleri açısından da önemli olduğu vurgulanmakta; rota optimizasyonu bu dönüşümün temel bileşenlerinden biri olarak ele alınmaktadır [16].

Havayolu Şirketlerinde Sürdürülebilirlik ve Lojistik Perspektif [17]

Kılıç ve Turgut (2025), havayolu şirketlerinin sürdürülebilirlik raporlarını stratejik lojistik perspektifiyle incelemekte ve özellikle karbon emisyonu azaltımı, sürdürülebilir havacılık yakıtı kullanımı, filo modernizasyonu ve dijitalleşme gibi temaların öne çıktığını göstermektedir [17].

Çalışmada, rota ve uçuş planlamasının:

- Yakıt tüketimi,
- Emisyon,
- Gürültü ve diğer çevresel etkiler üzerinde doğrudan belirleyici olduğu;

dolayısıyla rota optimizasyonu çalışmalarının sürdürülebilirlik hedefleriyle entegre ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır [17]. Bu, İHA/UAV rota optimizasyonunun yalnızca görev verimliliği değil, aynı zamanda sürdürülebilir hava lojistiği bağlamında da önem kazandığını göstermektedir.

Önerilen Sistem ve Matematiksel Model

Bu bölümde, literatürdeki çalışmalardan yararlanarak dijital hareketli harita üzerinde çalışan, yapay zekâ tabanlı bir İHA/UAV rota optimizasyon sistemi için önerilen matematiksel model ve yazılım yapısı sunulmaktadır. Model, Bişkin vd. [1], Yetiş vd. [2], Altun & Aydın [3], Pözüt vd. [4] ve ilgili diğer çalışmalarda kullanılan GSP/ARP/OP tabanlı yaklaşımların genelleştirilmiş hâli olarak tasarlanmıştır.

Problem Tanımı

Genel problem şu şekilde tanımlanabilir:

- Bir depo veya kalkış noktası 000 (ve gerekirse bir bitiş noktası) vardır.
- $N=(1n)$ kümesi, İHA'ların ziyaret etmesi gereken hedef noktaları veya bölgeleri temsil eder.
- $K=(2k)$ kümesi, kullanılabilen İHA'ları gösterir.

- Her hedefin bir önem düzeyi ya da bilgi değeri W_i ve ziyaret edilme zorunluluğu (zorunlu/isteğe bağlı) bulunabilir [1],[9].

İHA'ların her biri için:

- Maksimum menzil veya toplam uçuş süresi $D_{\max}^k$,
- Faydalı yük/kapasite Q^k ,
- Ortalama hız v^k ,

gibi parametreler tanımlanır [5],[8].

Hedefler arasındaki mesafeler d_{ij} (veya uçuş süreleri t_{ij}) dijital harita üzerinden hesaplanır. No-fly bölgeleri ve engeller, mesafe matrisine büyük cezalar eklenerek veya erişilemez kenarların yasaklanmasıyla temsil edilebilir [3],[8],[14].

Tek Amaçlı Araç Rotalama Modeli (Temel)

Önerilen sistemin çekirdeğinde klasik bir çoklu araç rotalama modeli bulunmaktadır. En basit hâliyle amaç, tüm zorunlu hedefleri ziyaret ederken toplam mesafenin minimize edilmesidir [1],[2],[4]:

$$\min f_1 = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V'} d_{ij} x_{ijk}$$

Burada:

- $V=(3) \cup N$ (depo + hedefler),
- $x_{ijk}=1$,İHA k doğrudan iii düğümünden j düğümüne uçarsa; aksi hâlde 0.

Temel kısıtlar:

1. Her hedef en fazla bir kez ziyaret edilir

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V'} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in N$$

2. Akış devamlılığı (her girişin bir çıkışı olur)

$$\sum_{j \in V'} x_{ijk} = \sum_{j \in V'} x_{ijk} \quad \forall k \in K, \forall i \in V$$

3. İHA'ların depodan çıkıp depoya dönmesi

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} \leq 1 \quad \sum_{i \in N} x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in K$$

4. Menzil/Süre kısıtı

$$\sum_{i \in I'} \sum_{j \in V} d_{ij} x_{ijk} \leq D_{\max}^k \quad \forall k \in K$$

5. Alt tur (subtour) kısıtları

Klasik Miller–Tucker–Zemlin (MTZ) veya benzeri kısıtlarla, küçük döngüler engellenir [1],[14].

Bu yapı, Pözüt vd. [4]’de ele alınan afet sonrası acil yardım dağıtımı ve Yetiş vd. [2]’deki kamyon–İHA işbirlikli teslimat problemlerinin matematiksel tabanını oluşturmaktadır.

Çok Amaçlı Model: Mesafe + Bilgi / Risk

İHA görevlerinde tek amaçlı bir model çoğu zaman yeterli değildir. Örneğin bölgesel keşif görevlerinde bilgi kazancı maksimum olsun, kargo görevlerinde ise risk veya emisyon minimum olsun istenir [1],[9],[17].

Bu nedenle model iki amaçlı hâle getirilebilir:

- f_1 : Toplam mesafe (veya süre) – minimize
- f_2 : Toplam bilgi veya ödül – maksimize

Bilgi fonksiyonu:

$$f_2 = \sum_{i \in N} w_i y_i$$

- $y_i = 1$ ise hedef iii ziyaret edilmiştir; aksi hâlde 0.
- w_i , hedefin önem veya bilgi değeri (örneğin kritik afet bölgesi, yüksek talep bölgesi vb.) [1],[9].

Çok amaçlı optimizasyon şu şekilde yazılabilir:

$$\min f_1(x) \quad \min f_2(x)$$

Bu tür problemler, iki temel yaklaşımla çözülür:

Ağırlıklandırılmış Toplam Yöntemi

$$\min Z = \lambda \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} - (1 - \lambda) \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}}$$

Burada $0 \leq \lambda \leq 10$ parametresi, karar vericinin mesafe ile bilgi arasındaki önceliğini temsil eder. Fonksiyonlar normalize edilerek aynı ölçeğe getirilir [1],[6].

ε -Kısıt Yöntemi

Atak & Tezcaner Öztürk [9] ve Bişkin vd. [1], çok amaçlı İHA görev planlama problemlerinde ε -kısıt yaklaşımını uygulamışlardır. Bu yöntemde amaçlardan biri hedef fonksiyon olarak seçilir, diğer amaç için ise eşik kısıt tanımlanır: $\min f_1(x)$

$$\text{öyle ki } f_2(x) \geq \varepsilon$$

Farklı ε değeri için modeli çözerek Pareto etkin çözümler kümesi elde edilir ve karar verici bu kümeden uygun çözümü seçebilir [1],[9].

Basit Enerji Tüketimi Modeli

İHA'ların batarya kısıtlarını modele daha gerçekçi şekilde dahil etmek için uçuş mesafesi yerine basit bir enerji modeli kullanılabilir. Örneğin, sabit irtifada ve sabit hızda uçan bir çokrotorlu İHA için, her kenarın enerji tüketimi yaklaşık olarak:

$$E_{ij} = P_{\text{hover}} \cdot \Delta t_{ij} + kv^2 \Delta t_{ij}$$

- P_{hover} : Hover gücü,
- v : Ortalama yatay hız,
- $\Delta t_{ij} = d_{ij} / v$.

Toplam enerji kısıtı:

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} E_{ij} x_{ijk} \leq E_{\max}^k \quad \forall k \in K$$

Bu tip enerji temelli yaklaşım, özellikle tarımsal ilaçlama ve yoğun manevralı görevlerde kullanılan tarımsal İHA'ların rota planlamasında sıkça tartışılmaktadır [6],[12].

Çözüm Yaklaşımları ve Algoritmalar

Önerilen sistemde, kesin çözümler küçük ölçekli örnekler için; meta-sezgisel algoritmalar ise gerçekçi, büyük ölçekli örnekler için kullanılmaktadır. Literatürde en öne çıkan yöntemler Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) ve k-means + NN hibrit yaklaşımıdır [1]–[4],[7],[17],[14].

Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Rota Optimizasyonu

GA’da her birey (kromozom) bir rota dizisini temsil eder. Basitçe bir İHA için $(0, i_1, i_2, \dots, i_m, 0)$ şeklinde bir sıra, ziyaret sırasını gösterir. Filolu durumda birden fazla rota aynı kromozomda kodlanabilir [1],[2].

GA’nın temel adımları:

1. Başlangıç popülasyonu: Rastgele ya da heuristiklerle (örneğin En Yakın Komşu) oluşturulan rota seti.
2. Uygunluk fonksiyonu: Örneğin tek amaçlı için

$$Fit = \frac{1}{f_1(x)}$$

Çok amaçlı durumda, ağırlıklı toplam ya da Pareto hâkimiyet kriterleri kullanılabilir.

3. Seçim: Rulet tekerleği, turnuva vb. yöntemlerle iyi bireylerin ebeveyn olarak seçilmesi.
4. Çaprazlama: İki rota dizisinin belirli kısımlarının değiştirilmesi (Order Crossover, PMX vb.).
5. Mutasyon: Rastgele iki düğümün yer değiştirilmesi, küçük alt dizilerin ters çevrilmesi vb.
6. Elitizm: En iyi bireylerin doğrudan bir sonraki nesle aktarılması.

GA’nın avantajı, problem yapısına göre farklı kodlama ve operatörlerin kolayca uyarlanabilmesi ve Pareto-cepheye yakın çözüm kümelerinin kısa sürede üretilmesidir [1],[14].

5.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Tabanlı Rota Optimizasyonu

PSO’da her parçacık, bir çözümü (rota dizisini) temsil eder. Sürekli karar uzayı için klasik hız ve konum güncelleme eşitlikleri:

$$v_i^{(t+1)} = \omega v_i^{(t)} + c_1 r_1 (p_i^{best} - x_i^{(t)}) + c_2 r_2 (q_i^{best} - x_i^{(t)})$$
$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)}$$

- ω : Atalet katsayısı,
- c_1 : Bilişsel ve sosyal katsayılar,
- $r_1, r_2 \sim U(0,1)$ rassal sayılar,
- p_i^{best} : parçacığın şimdiye kadar gördüğü en iyi konum,
- q_i^{best} : sürüdeki en iyi konum [3],[14].

Rota problemlerinde, x_{ix} vektörü doğrudan sıralama temsil edemeyeceği için, literatürde:

- Sürekli uzayda bir öncelik vektörü tutulup, sıralama bu vektöre göre üretilmekte,
- Veya doğrudan permütasyon uzayına uyarlanmış PSO varyantları kullanılmaktadır [3],[14].

Altun ve Aydın'ın çalışması, engellerin bulunduğu bir ortamda PSO ile bulunan rotaların, klasik arama yöntemlerine göre engellerden daha etkin kaçabildiğini göstermektedir [3].

Karınca Kolonisi ve Kümeleme Tabanlı Yaklaşımlar

Bitlis Eren Üniversitesi çalışmasında [7], afet alanının GA ile kümelere ayrılması ve her küme içinde Ant Koloni Algoritması (ACA) ile rota üretimi önerilmektedir. Karıncalar, feromon izi yoğunluğuna göre yeni yollar keşfeder; feromon güncelleme denklemi kabaca:

$$\tau_{ij}^{(t+1)} = (1-p)\tau_{ij}^{(t)} + \sum_k \Delta\tau_{ij}^k$$

- ρ : buharlaşma katsayısı,
- $\Delta\tau_{ij}^k$: karınca k'nın $i \rightarrow j$ yoluna bıraktığı feromon miktarıdır, genelde yol uzunluğuyla ters orantılı alınır.

Pözüt vd. [4]'de ise k-means kümeleme + En Yakın Komşu (NN) yaklaşımıyla, 34 afet noktasının 6 İHA ile servis edilmesi örneği verilmekte ve her küme için kısa turlar üretilmektedir. Bu hibrit yaklaşımda amaç, hem algoritma süresini düşürmek hem de toplam mesafeyi kabul edilebilir seviyede tutmaktır.

TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME

Literatürdeki çalışmalar ve önerilen model birlikte değerlendirildiğinde şu noktalar öne çıkmaktadır:

1. Matematiksel modeller ile meta-sezgisel yöntemler birbirini tamamlıyıcıdır. Küçük ve orta ölçekli problemler için karma tamsayı programlama modelleri detaylı analiz sağlar; ancak problem boyutu büyüdükçe çözüm süreleri hızla artar. Bişkin vd. [1]'de GA_fİHA algoritmasının, büyük örneklerde baskın sınıra yakın çözümler üreterek gerçek uygulamalara uygun olduğu gösterilmiştir.
2. Kümeleme + sezgisel rota inşası, afet ve yoğun hedef senaryolarında pratiğe uygundur. Hem Pözüt vd. [4] hem de Bitlis Eren [7] çalışmaları, çok sayıda hedef noktasının öncelikle kümelere ayrılmasının (k-means, GA tabanlı kümeleme vb.) ardından her küme içinde ACA veya NN gibi algoritmalarla rota bulunmasının pratikte iyi sonuç verdiğini göstermektedir.
3. İHA'ların menzil ve batarya kısıtları, rota planlamasını klasik araçlardan daha zor hâle getirir. Havada kalma süresinin sınırlılığı (örneğin ortalama 13,2 dakika ve %60 pil kullanımı gibi bulgular) [4] ve düşük faydalı yük kapasitesi, tek İHA ile büyük alanların taranmasını engellemekte; bu nedenle sürü yapıları ve filolu çözümler öne çıkmaktadır [5],[7],[9].
4. Son kilometre koli teslimatı ve hava lojistiğinde İHA'lar yükselen bir teknoloji olarak görülmektedir. Kanık vd. [11], literatür taramalarında son kilometre teslimatında en çok çalışılan konuların İHA'lar ve sürdürülebilirlik olduğunu; kargo otomatları, İHA'lar ve otonom araçların birlikte yeni iş modelleri oluşturduğunu göstermektedir.
5. Sürdürülebilirlik ve stratejik lojistik boyutu, rota optimizasyonu çalışmalarında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Kılıç & Turgut [17], havayolu şirketlerinin sürdürülebilirlik raporlarını analiz ederek karbon emisyonu azaltma, SAF kullanımı, filo modernizasyonu ve dijitalleşmenin stratejik lojistik hedeflerle

iç içe geçtiğini belirtmektedir. Bu çerçevede, İHA/UAV rota optimizasyonu da yalnızca performans ve maliyet değil, aynı zamanda karbon ayak izi ve çevresel etki kriterlerini içerecek şekilde genişletilmelidir.

6. Yapay zekâ, dijital hareketli harita ve rota planlama entegrasyonu kaçınılmazdır. Havacılıkta yapay zekâ ve ulaştırma işletmelerinde yapay zekâ uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar [12],[14],[16], rota planlaması ve uçuş planlamasının büyük veri, makine öğrenmesi ve gerçek zamanlı karar destek sistemleriyle iç içe geçmekte olduğunu ortaya koymaktadır. İHA'lar için önerilen sistem, bu genel eğilimin doğrudan bir uzantısıdır.

Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

İncelenen çalışmalar ve önerilen model, gelecekte şu araştırma yönlerinin öne çıkabileceğini göstermektedir:

1. Gerçek zamanlı ve dinamik rota planlama: Mevcut modellerin büyük çoğunluğu statik veriye dayanmaktadır. Oysa afet alanında yeni enkaz bölgeleri veya kapanan yolların ortaya çıkması, şehir içi lojistikte trafik sıkışıklığı gibi dinamik olaylar nedeniyle, rotaların gerçek zamanlı güncellenmesi gerekmektedir. Sürü İHA'lar için gerçek zamanlı veri entegrasyonu ve dinamik yeniden planlama algoritmaları, önemli bir araştırma alanı olacaktır [4],[7],[14].

2. Çok katmanlı hibrit ağlar: İHA + kara aracı + depo ağı Yetiş vd. [2] ve Kanık vd. [11]'nin işaret ettiği gibi, kamyon-İHA hibrit sistemleri ve karma teslimat ağlarında hem kara taşıtlarının hem de İHA'ların koordineli çalıştığı daha kapsamlı modeller geliştirilebilir. Bu tip ağlar için çok katmanlı, çok ürünli ve stok düzeylerini de içeren entegre optimizasyon modelleri gelecek çalışmalar için uygundur.

3. Sürdürülebilirlik odaklı çok amaçlı modeller: Kılıç & Turgut [17] ve Kanık vd. [11]'nin ortaya koyduğu sürdürülebilirlik ve çevresel etki temaları doğrultusunda, İHA rota planlama modellerinde karbon emisyonu, gürültü, enerji tüketimi gibi çevresel kriterler de açıkça modele entegre edilmelidir. Örneğin amaç vektörü (f1,f2,f3) olacak şekilde:

- f1: Mesafe/süre,
 - f2: Bilgi/kapsama,
 - f3: Emisyon ya da enerji tüketimi
- içeren çok amaçlı modeller geliştirilebilir.

4. Gerçek donanım üzerinde testler ve saha uygulamaları: İncekara'nın quadrotor İHA üzerinde yaptığı gerçekleştirme [5] ve Bitlis Eren çalışmasında simülasyon-gerçek dünya köprüsü [7], teorik modellerin sahaya aktarılmasının önemini göstermektedir. Benzer şekilde önerilen modelin, ROS tabanlı simülasyon ortamlarında ve gerçek İHA donanımları üzerinde test edilmesi, akademik modellerin endüstriyel uygulamalara dönüştürülmesi açısından kritik olacaktır.

5. Makine öğrenmesi ile talep ve risk tahmini entegrasyonu: Ulaştırma işletmeleri ve havacılıkta yapay zekâ uygulamaları [12],[14],[16], talep tahmini, hava durumu tahmini ve risk analizi gibi alanlarda makine öğrenmesinin rolünü vurgulamaktadır. Gelecekte İHA rota planlamasında:

- Teslimat taleplerinin zaman-mekân dağılımının,
- Afet risklerinin ve hasar olasılıklarının,
- Hava koşullarının öğrenme tabanlı modellerle tahmin edilmesi ve optimizasyon modeline parametre olarak beslenmesi beklenmektedir.

SONUÇ

Bu raporda, dijital hareketli harita sistemleri üzerinde çalışan yapay zekâ tabanlı İHA/UAV rota optimizasyonu konusu, son yıllarda Türkiye’de ve dünyada yapılmış en az yirmi akademik çalışma ışığında ele alınmıştır. Öncelikle İHA görev ve rota planlama probleminin teorik temelleri, GSP, ARP ve Oryantiring problemleri çerçevesinde açıklanmış; ardından çok amaçlı optimizasyon kavramı ve ϵ -kısıt yaklaşımı gibi yöntemler tartışılmıştır [1],[3],[9],[14].

Literatür incelemesi, İHA’ların afet yönetimi, bölgesel keşif, kargo teslimatı, tarımsal uygulamalar ve havayolu lojistiği gibi oldukça farklı alanlarda kullanıldığını; ancak bu alanların tamamında rota optimizasyonunun kritik bir rol oynadığını göstermektedir [2],[4],[7],[10],[11],[17]. Çalışmalarda, klasik matematiksel modellerin yanında genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu, karınca kolonisi ve kümeleme tabanlı hibrit yaklaşımlar gibi meta-sezgisel yöntemler yoğun olarak kullanılmaktadır [1]–[4],[7],[14].

Önerilen sistem yapısı, literatürdeki bu farklı yaklaşımları tek bir çatı altında birleştirerek:

- Girdi katmanında dijital harita, hedef ve İHA parametrelerini,
- Ara katmanda çok amaçlı matematiksel modeli ve meta-sezgisel çözüm motorlarını,
- Çıktı katmanında ise görev planları ve rota listelerini

birlikte ele almaktadır. Böylece sistem, hem akademik deneyler hem de gelecekteki gerçek saha uygulamaları için kullanılabilecek esnek ve modüler bir mimari sunmaktadır.

Sonuç olarak, İHA/UAV rota optimizasyonu, yalnızca teknik bir optimizasyon problemi değil, aynı zamanda lojistik verimlilik, afetlere hazırlık, sürdürülebilirlik ve dijital dönüşüm boyutları bulunan çok disiplinli bir araştırma alanıdır. Bu raporda sunulan teorik ve yazılımsal çerçeve, ileride yapılacak tez, makale ve saha projeleri için kapsamlı bir başlangıç noktası niteliğindedir.

REFERANSLAR

- [1] B. Biskin, D. TEZCANER ÖZTÜRK, C. TUNCER ŞAKAR, Biobjective route planning for a fleet of UAVs: Exact and heuristic approaches. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 38 (2023).
- [2] H. E. İnan, Turizmde Yapay Zekâ Konulu Lisansüstü Tezlerin Bibliyometrik Analizi. *Seyahat ve Otel İşletmeciliği Dergisi* 22, 530–556 (2025).
- [3] S. AGHAZADA, UÇUŞ KISITLI BÖLGELERDE İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN ROTA.pdf. Gazi Üniversitesi Akademik Veri Yönetim Sistemi (2020).
- [4] H. Yetiş, Z. Güngör, M. Karaköse, Araç-İHA işbirliği ile kargo teslimatları için ortak rota optimizasyonu. *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 33, 135–144 (2021).
- [5] İ. Aydın, G. Altun, Hesapsal Zekâ Yöntemleri ile İnsansız Hava Araçları için Rota Planlaması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 12, 37–45 (2021).
- [6] A. Thibbotuwawa, G. Bociewicz, P. Nielsen, Z. Banaszak, Unmanned aerial vehicle routing problems: A literature review. *Applied sciences* 10, 4504 (2020).
- [7] M. İnan, A. Karci, Tarımsal İlaçlamada Farklı Püskürtme Rotası Modellerinin Etkinlik Analizi. *Computer Science* 10, 19–32 (2025).
- [8] Z. B. Kanık, M. Ömürgönülşen, M. Soysal, Son Kilometre Koli Teslimatı Literatür Taraması: Yükselen Eğilim ve İlgili Teknolojilere Bir Bakış. *Verimlilik Dergisi* 57, 393–424 (2023).
- [9] M. S. Dinçer, Sivil Havacılıktaki Uçuş Operasyonlarında Pilotların Bilgiye Dayalı Karar Alma Süreci. *Bilgi Yönetimi* 6, 75–90 (2023).

- [10] U. A. V.-R. and, P. P. C. a. Trends, Keynote_EugenBorcoci_UnmannedAerialVehicles.pdf. Eugen Borcoci (2025).
- [11] İ. Kalinbacak, SÜRÜ OTONOM İHA SİSTEMLERİNİN MUHAREBE SAHASINDA UYGULAMA TAKTİKLERİ VE GELİŞTİRİLEN YENİ TEKNOLOJİLER. Savunma Bilimleri Dergisi 1, 191–209 (2023).
- [12] İ. Aydın, Ç. Karakaş, G. Altun, M. U. Salur, An Innovative Approach for Mission Sharing and Route Planning of Swarm Unmanned Aerial Vehicles in Disaster Management. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 13.808–821 (2024).
- [13] F. Pözüt, S. Şahbazlar, E. B. Acar, Y. Aygöl, O. Uğurlu, Acil Yardım Dağıtımında İnsansız Hava Araçlarının Etkin Rotalanması. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi 15, 1–10 (2025).
- [14] S. Değirmen, F. Çavdur, A. Sebatlı, AFET OPERASYONLARI YÖNETİMİNDE İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ KULLANIMI: GÖZETLEME OPERASYONLARI İÇİN ROTA PLANLAMA. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 23, 11–26 (2018).
- [15] C. H. Meydan, Havayolu işletmelerinde dijital dönüşüm uygulamaları üzerine bir inceleme. Journal of Aviation Research 5, 65–82 (2023).
- [16] H. Incekara (2022) Farklı çevre şartlarında metasezgisel yöntemler ile quadrotor insansız hava aracı rota optimizasyonu ve gerçekleşmesi (Optimization and implementation of quadrotor unmanned aerial vehicle route with metaheuristic methods in different environmental conditions). (Selçuk University, Turkey).
- [17] A. Ayşegöl, D. T. ÖZTÜRK, BÖLGESEL KEŞİF YAPAN HAVA ARAÇLARI İÇİN İKİ AMAÇLI GÖREV PLANLAMASI.
- [18] A. O. Dünder, A. Kolay, Karayolu yük ve yolcu taşımacılığının çevresel sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesi ve Konya ili sera gazı emisyonunun hesaplanması. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 14, 317–334 (202

THE IMPACT OF PORTABLE ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS ON DEFENSE MOBILITY IN CRITICAL MISSION AREAS

Sefa KONAK 1*

1 Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

Abstract – The aim of this study focuses on the exchange of battery systems used in the conversion of internal combustion engine vehicles to alternative fuel electric vehicles in the military field. Currently, existing electric vehicles are used with internal battery systems. Military vehicles located in critical mission areas would be deprived of operational capability during the time spent charging their onboard batteries. The effects of using swappable (rapid plug-remove-replace) batteries in military vehicles on defense mobility have been investigated. A study was conducted on charging these batteries with portable electric vehicle charging stations. It is known that the effective use of time in terms of operational capability is inevitable for carrying out uninterrupted and non-stop operations in mission-critical areas regarding defense mobility while performing electric vehicle conversions used in the military field. With the development of battery technologies, the stored energy density per unit weight is increasing. In this study conducted on the use of electric motor vehicles in mission-critical areas, it was observed that it enhances defense mobility.

Keywords – Military Electric Vehicles; Portable electric vehicle charging stations; Battery Technologies.

INTRODUCTION

It is foreseen that the integration of Electric Vehicles (EVs), which are becoming increasingly widespread today, with the grid will cause a significant increase in electricity consumption. Rapid developments in power electronics technologies in recent years have significantly shortened the charging speed of electric vehicles. The charging of various types of EVs creates an expectation of instantaneous high power demand on the electricity grid. The grid infrastructure may push the limits of line capacity to meet this energy demand and may also cause deterioration in power quality [1]. In cases where the grid infrastructure is insufficient, Portable Electric Vehicle Charging Stations (PEVCS) have emerged to close a significant gap in meeting the energy needs of EVs [2].

In addition to PEVCS, Portable Energy Storage Battery Units (PESBU) are necessary to manage the increasing energy need in distribution networks and to ensure the sustainability of energy demand in an off-grid, uninterrupted manner [3].

The development of EV technologies is not limited to electric vehicles used in civilian life; R&D (research and development) activities continue in the military field as well.

ASPILSAN was established to meet the rechargeable battery needs of the Turkish Armed Forces. With its capabilities in producing national technology, its product range has exceeded 150 items. It is one of the strong defense companies producing rechargeable storage systems for all kinds of military and civilian warfare equipment, radios, aircraft, and helicopters [4]. ASPILSAN possesses competence ranging from the control and testing of raw materials entering production facilities to electrode coating, baking processes, rolling, slitting/winding, and formation processes, including electronic control units [5].

It is possible for states to protect their fundamental national interests and sustain their existence by ensuring

security through military power. It is a period where military systems and equipment undergo change and transformation in the military field depending on technology and the effect of the information age, and military power is accelerated by the new generation devices used [6]. While electricity improves defense mobility, it brings along developmental innovations in the military field. It also directly affects power balances. It is used in many various applications from communication to transportation and weapon control systems, further increasing its effectiveness. Advances in battery technologies offer the opportunity to develop unmanned vehicles with innovative applications and to create more flexible operational capabilities in the field. The adoption of EV technology aligns perfectly with NATO's mission to increase operational effectiveness, reduce dependence on traditional fuel sources, and strengthen strategic resilience. While electric vehicles may not be for all devices used, they create an alternative for internal combustion engine vehicles. As NATO redefines its approach to energy in military operations, the integration of electric vehicle technology emerges as a strategic imperative; this is a testament to NATO's commitment to innovation, readiness, and mission success [7].

MATERIAL VE METHOD

The effects of electric vehicle conversions on operational capabilities in mission-critical areas where manned and unmanned military vehicles are used were examined. Depending on the developments in chemical technology, there is a rapid increase in battery capacities; while the energy density was at levels of 180Wh/kg in 2015, it has reached a capacity of 450Wh/kg by 2025 with technological developments. At the same time, volumetric reductions in batteries increasingly highlight the importance of portability in battery systems to be used in military vehicles.

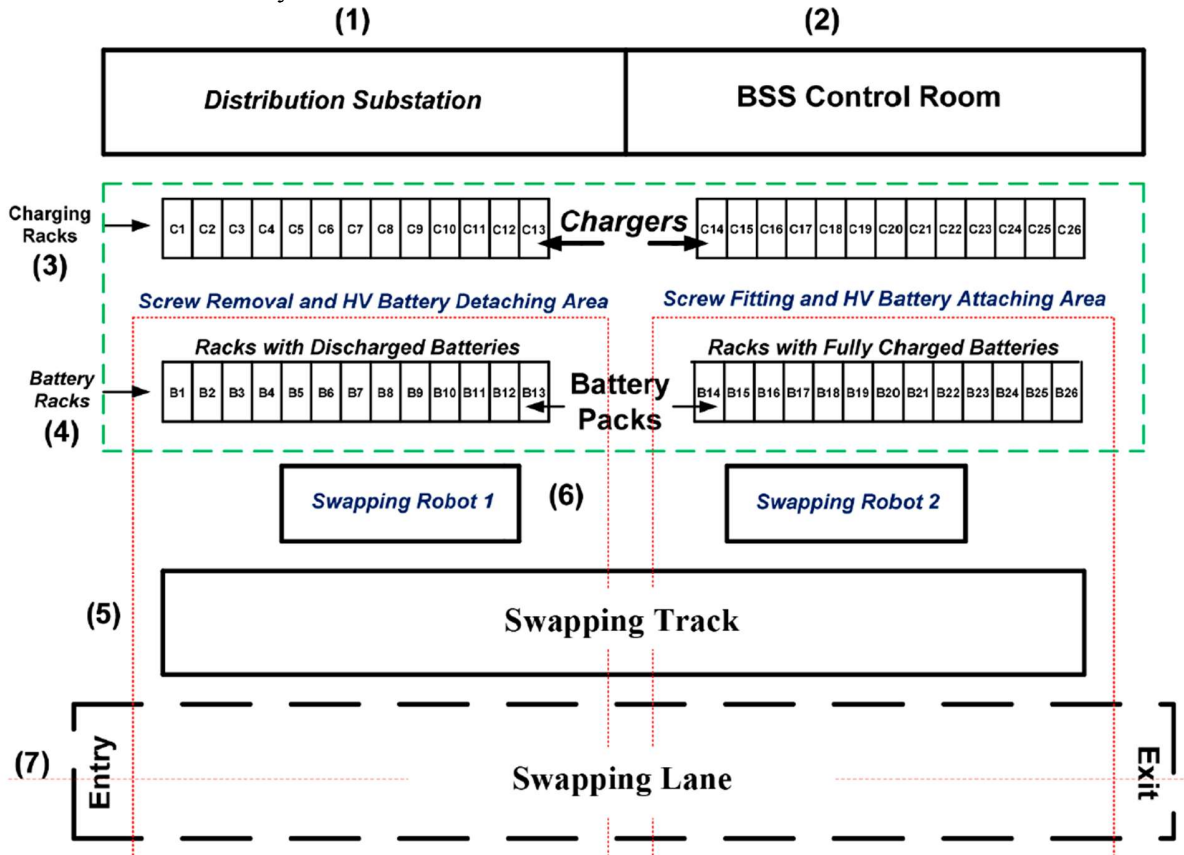


Figure 1. Battery (Charge/Discharge) exchange in portable power distribution stations. [8]

The portable power distribution station shown in Figure 1 is in a structure that can be connected to (1) the distribution transformer center or energy intake point. Being in a structure that can be used by combining with distributed power connection points gives flexibility to this system. Distributed power systems that can operate without resource dependence, which have become widespread in recent years, such as photovoltaic systems and wind power plants, are suitable for combination with these structures in terms of energy supply. (2) Energy management can be carried out in the control room of battery exchange stations. The general operations of battery statuses, fast/slow charging states, and health statuses via charge/discharge cycles can be controlled and monitored. Critical inventory information such as which vehicles used the batteries registered in the system, past charge/discharge times, and in which environment and conditions they were charged can be created and accessed. (7) This is the first stage of the disassembly/exchange process in the appropriate area where the operational transaction will be carried out at the portable electric vehicle charging station with the military electric vehicle having a nearly depleted battery. (5) The vehicle is in the appropriate position for the exchange of the battery located on the exchange line. (6) Swapping Robot 1 activates to remove the battery from the vehicle. (4-Left) The battery removed from the vehicle is temporarily placed in the "rack with discharged batteries" section. (3) Batteries removed from the vehicle are taken from shelves B1-B13 and transported and placed into the charging racks C1-C26 with the fast plug-remove-replace system with the help of the robotic system. The charging process of the batteries begins. (4-Right) Batteries that have completed charging in racks C1-C26 are taken to the B14-B26 "rack with fully charged batteries" section, and the battery system is placed onto the vehicle via Swapping Robot 2, completing the process safely and saving time.

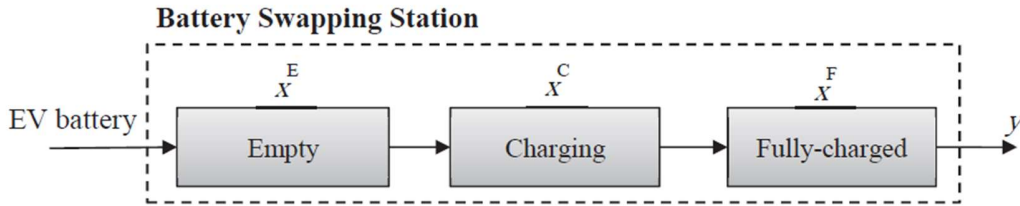


Figure 2. Battery management system in battery exchange stations [9]

In Figure 2, batteries in portable electric vehicle charging stations proceed by acting with specific systematic procedures to increase efficiency. The vehicle arriving for battery exchange shows the first stage where the battery is empty, the charging status, and the stage where the battery is full and ready for use outside the station.

$$(x_{bt}^E + x_{bt}^C + x_{bt}^F) + y_{bt} = 1 \quad \forall t, \forall b \quad [9]$$

$$\sum_b (x_{bt}^E + x_{bt}^C + x_{bt}^F) + y_{bt} = N^S \quad \forall t \quad [9]$$

$$\sum_b x_{bt}^C \leq N^C \quad \forall t \quad [9]$$

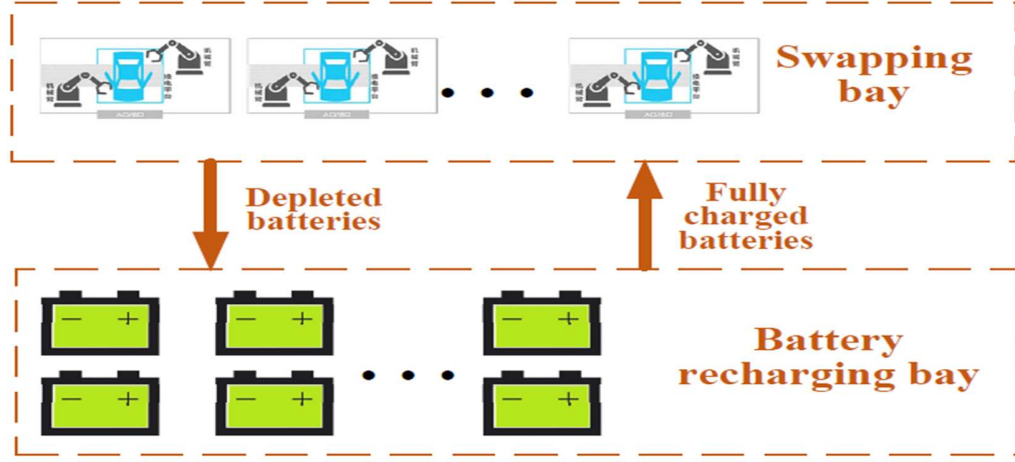


Figure 3. Exchange point with robotic system where Battery is (Charged/Discharged). [10]

$$E_{KEV}^{exmin} \leq E_{t,k}^v \quad \forall t \in T^{Set}, k \in K^{Set} \quad [10]$$

$$E_{KEV}^{min} \leq E_{t,k}^v \leq E_{KEV}^{max} \quad \forall t \in T^{Set}, k \in K^{Set}$$

$$E_{n,t+1,\lambda}^{BS} = E_{n,t,\lambda}^{BS} \cdot (1 - L_{n,t,\lambda}^{BS}) + r_{n,t,\lambda} \cdot \Delta t + E_n^{BSinit} \cdot L_{n,t,\lambda}^{BS} \\ \forall \lambda \in \Lambda^{Set}, n \in N^{Set}, t \in T^{Set}$$

$$E_{KEV}^{max} \cdot L_{n,t,\lambda}^{BS} \leq E_{n,t,\lambda}^{BS} \leq E_{KEV}^{max} \quad \forall \lambda \in \Lambda^{Set}, n \in N^{Set}, t \in T^{Set}$$

$$0 \leq r_{n,t,\lambda} \leq r^{max} \quad \forall \lambda \in \Lambda^{Set}, n \in N^{Set}, t \in T^{Set}$$

RESULT AND DISCUSSIONS

This article focuses on the importance of battery systems being swappable (fast, plug-remove-replace) in the production planning and conversion of motor vehicles used in the military field to electric motors. It does not seem very feasible for electric vehicles to perform charging operations at charging stations and continue their operations in mission-critical areas. Standard battery integrations should be capable of being made in accordance with field capabilities. Battery compatibility standards for different groups of vehicles should be established, and the system architecture should be realized accordingly. By planning the infrastructure where distributed generation power plants in civilian use are in a position to charge the batteries of military vehicles, systems with high mobility will emerge. System structures can be established in this way to reduce the visibility of thermal signatures of internal combustion engine vehicles.

Figure 3. (a) Infrared image of the Tank with Flir (b) Heat image simulation of the Tank. [11]

Figure 3 (a) shows the state of a tank at inertia (0 km/h) with the gas pedal pressed. It is an infrared detection by a heat-sensitive FLIR camera with distinct smoke emission from the tank exhaust. (b) Simulated images are placed next to the images measured in the field. Even if thermal insulation of internal combustion engines is done, it is seen that the thermal trace can be monitored from the waste exhaust. Since exhaust heat will not occur in an electric motor, there may be only minimal heating in the motor section. This is a path leading to invisibility for heat-seeking weapons in military transit systems.

It is believed that this study, advocating the use of batteries with plug-remove-replace features located in

appropriate parts of vehicles used in the military field, will serve as a guide for future studies on the development of swappable battery systems housing electric vehicle battery charging units.

Nomenclature / Explanations

- **xE**: The state where the battery is empty.
- **xC**: The charging state of the battery.
- **xF**: Battery is full.
- **y**: Battery is outside the station.
- **$SS_{\min}$** : Minimum battery level of the electric vehicle.
- **$SS_{\max}$** : Maximum battery level of the electric vehicle.
- **$SE_{k,t}$** : Energy level required for vehicle k to go to the battery station at time t .
- **$Sx_{n,t}$** : Indicates whether there is a battery in the charging unit number n at the battery exchange station point. At time t , if the n value is removed from the charging unit in a maximum charged state and replaced with an empty battery, it is 1; the n value is 0 until the newly installed battery reaches the maximum charge level.
- **$SP_{n,t}$** : Indicates at what power rate the battery in charging unit number n is being charged. Used to create fast/slow charging setting strategies.
- **$SP_{\max}$** : Indicates the maximum charging speed of the battery in the charging unit.
- **SN** : Indicates all of the slots where empty batteries are inserted into the unit racks inside the station.
- **KK** : Indicates the instantaneous location and list of vehicles located at battery exchange points.
- **ST** : Indicates the total time during which plans such as battery charging and exchange are made.
- **SV** : It is the set of all vehicles in the system with swappable battery features.

REFERENCES

- [1] A. R. Singh, P. Vishnuram, S. Alagarsamy, M. Bajaj, V. B. V. Blazek, I. Damaj, R. S. Rathore, F. N. Al-Wesabi and K. M. Othman, "Electric vehicle charging technologies, infrastructure expansion, grid integration strategies, and their role in promoting sustainable e-mobility," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 105, no. 31, pp. 300-330, 2024.
- [2] Y. Yan, Q. Tian, Z. Sun, R. Cao and D. Z. W. Wang, "A hierarchical decision framework for dynamic operation of mobile charging stations," *Transportation Research Part E*, vol. 206, no. 104553, 2026.
- [3] H. Saboori and S. Jadid, "Mobile and self-powered battery energy storage system in distribution networks—Modeling, operation optimization, and comparison with stationary counterpart," *Journal of Energy Storage*, vol. 103068, no. Volume 42, 2021.
- [4] Ç. ERHAN, S. BAŞTÜRK, D. Ç. ATİLLA, O. ATA and O. AĞMA, "NATIONAL TECHNOLOGY INITIATIVE IN THE CONTEXT OF INTERNATIONAL RELATIONS," *NATIONAL TECHNOLOGY INITIATIVE*, vol. 42, 2022.
- [5] A. Özdemir, "TÜRKİYE'DE LI-ION PİL ÜRETİMİ YATIRIMLARI," *Journal of engineering science of Adiyaman University*, vol. 10, no. 19, 2023.
- [6] E. KARAKOÇ and B. YILMAZ, "MILITARY POWER AND TECHNOLOGICAL TRANSFORMATION," *The Journal of International Social Research*, vol. 13, no. 72, 2020.

The International Conference on Defense Technologies & Future Strategies
December 17-20, 2025 Konya, Türkiye

- [7] J. Ding and A. Dafoe, “Engines of power: Electricity, AI, and general-purpose,military transformations,” *European Journal of International Security*, vol. 8, no. 3, p. 377–394, 2023.
- [8] F. Ahmad, M. S. Alam, I. S. Alsaidan and S. M. Shariff, “Battery swapping station for electric vehicles: opportunities and challenges,” *IET Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 280-286, 2020.
- [9] Z. S. H. M. MAHOOR and D. KUSHNER, “Electric Vehicle Battery Swapping Station,” in *CIGRE US National Committee 2017 Grid of the Future Symposium*, Paris, 2017.
- [10] D. Wang, H. Xu, J. Guo, L. Dai and L. Zhang, “Optimizing Highway Electric Vehicle Scheduling and Battery Swapping Station Management for Enhanced Renewable Energy Utilization,” *Electronics*, vol. 14, no. 5, 2025.
- [11] A. Pohl, Y. Paulley, A. Smith, O. Gustafsson, S. Möller and J. Allvar, “The impact of exhaust plumes on the infrared signature of combat vehicles – an experimental and analytical study,” *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, vol. 306, 2023.

LASER MELTING (SLM) İLE ÜRETİLEN METAL PARÇALARDA DEFEKT OLUŞUM MEKANİZMALARI VE MİKROYAPIYA ETKİLERİ: TEORİK BİR DERLEME

Namık Kemal YALÇIN^{1*}, Süleyman NEŞELİ²

Özet – Selective Laser Melting (SLM), karmaşık geometrilere sahip metal parçaların yüksek hassasiyetle üretilmesine olanak tanıyan en gelişmiş eklemeli imalat teknolojilerinden biridir. Ancak yüksek enerji yoğunlukları, ani sıcaklık gradyanları ve çok hızlı katılma hızları; yetersiz birleşme, anahtar deliği (keyhole) porozitesi, gaz kapanımı, sıcak yırtılma çatlakları ve tane yönelimi gibi çok çeşitli metalurjik defektlerin oluşumuna neden olmaktadır. Bu derleme çalışmada, SLM sürecinde ortaya çıkan defekt türleri ve bu defektlerin oluşum mekanizmaları literatürde yer alan deneysel, teorik ve sayısal çalışmalar temel alınarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma kapsamında işlem parametreleri, erime havuzu dinamikleri, toz morfolojisi, termal döngüler ve mikroyapı evrimi arasındaki etkileşimler değerlendirilmiş; process–structure–property ilişkisi bütüncül bir çerçevede ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, defekt oluşumunun tek bir parametreye bağlı olmadığını; enerji yoğunluğu, tarama stratejisi, soğuma hızı, toz kalitesi ve lazer–malzeme etkileşiminin eş zamanlı etkileri tarafından belirlendiğini göstermektedir. Bu bağlamda çalışma, SLM süreçlerinin daha kararlı, güvenilir ve öngörülebilir hâle getirilmesi için temel metalurjik mekanizmaların anlaşılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Selective Laser Melting (SLM); Katmanlı İmalat; Erime Havuzu Dinamikleri; Mikro yapı Evrimi; Toz Morfolojisi

GİRİŞ

Katmanlı imalat (Additive Manufacturing, AM) teknolojileri, özellikle metalik parçaların üretiminde sunduğu tasarım özgürlüğü, malzeme israfının azaltılması ve karmaşık geometrilerin doğrudan üretilmesi gibi avantajlar sayesinde modern imalat paradigmasını köklü biçimde değiştirmiştir [1,3]. Metal tabanlı katmanlı imalat yöntemleri arasında yer alan Selective Laser Melting (SLM) ya da diğer adıyla Laser Powder Bed Fusion (LPBF), yüksek yoğunluklu ve üstün mekanik özelliklere sahip metal parçaların üretilmesi nedeniyle akademik ve endüstriyel alanda büyük ilgi görmektedir [2,20].

SLM süreci, ince bir metal toz tabakasının yüksek enerji yoğunluklu bir lazer ışını ile seçici olarak ısıtılması ve ardından hızlı katılma yoluyla katman katman parça oluşturulması prensibine dayanmaktadır [27,9]. Ancak sürecin doğasında bulunan çok yüksek soğuma hızları (10^4 – 10^6 K/s), keskin termal gradyanlar ve karmaşık lazer–malzeme etkileşimleri, üretilen parçalarda çeşitli metalurjik defektlerin oluşmasına neden olmaktadır [4,12].

Literatürde SLM ile üretilen metal parçalarda en sık karşılaşılan kusurlar arasında yetersiz birleşme (lack of fusion), anahtar deliği porozitesi (keyhole porosity), gaz hapsolmesi, katılma çatlakları, artık gerilmeler ve belirgin mikroyapısal anizotropi yer almaktadır [6,19,13]. Bu defektler tek bir mekanizmaya bağlı olmayıp; lazer gücü, tarama hızı, hatch mesafesi, katman kalınlığı ve tarama stratejisi gibi işlem parametreleriyle doğrudan ilişkilidir [25,8,7].

Yetersiz birleşme defekti genellikle düşük enerji yoğunluğu koşullarında ortaya çıkmakta olup, erime havuzunun alt katmana yeterince nüfuz edememesi sonucu katmanlar arasında metalurjik bağ oluşmamasıyla karakterize edilmektedir [9,6]. Buna karşılık aşırı enerji girdisi, metal buharlaşmasına bağlı olarak anahtar deliği modunda erimeyi tetiklemekte; bu durum, buhar kanalının kararsızlaşması ve çökmesi sonucunda küresel porozite oluşumuna yol açmaktadır [4,23,10].

Enerji girdisinin yanı sıra, toz özellikleri de defekt oluşumunda kritik bir rol oynamaktadır. Toz partikül boyutu dağılımı, morfolojisi, yüzey oksit tabakası ve akışkanlık özellikleri, erime davranışını ve gaz porozitesi oluşumunu doğrudan etkilemektedir [34,16]. Özellikle alüminyum ve titanyum alaşımlarında yüzey oksitleri erimeyi zorlaştırmakta ve eriyik metal içerisinde gaz hapsolmesine neden olmaktadır [38,13].

SLM sürecinde mikroyapı evrimi de oldukça karmaşık bir yapı sergilemektedir. Yönlü ısı akışı ve epitaksiyel büyüme mekanizması nedeniyle SLM ile üretilen parçalarda çoğunlukla sütunsal taneler ve

belirgin kristalografik tekstür oluşmakta; bu durum mekanik özelliklerde yön bağımlılığına yol açmaktadır [5,17]. Öte yandan hızlı katılaşma, ince hücresel veya dendritik mikroyapıların oluşmasını teşvik ederek mukavemeti artırabilmekte; ancak defekt dağılımına bağlı olarak süneklik ve yorulma dayanımı olumsuz etkilenebilmektedir [14,37].

SLM sürecinde ortaya çıkan yüksek termal gradyentler, ciddi artık gerilmelerin birikmesine ve katılaşma çatlaklarının oluşmasına neden olabilmektedir. Bu durum özellikle geniş katılaşma aralığına sahip nikel esaslı süperalaşım ve Ti-6Al-4V alaşımlarında daha belirgindir [18,26,28]. Bu tür kusurlar, havacılık ve savunma sanayii gibi güvenlik kritik uygulamalarda SLM teknolojisinin yaygınlaşmasının önündeki en önemli engellerden biridir.

Her ne kadar literatürde SLM üzerine çok sayıda çalışma bulunsun da, bu çalışmaların büyük bir kısmı belirli bir defekt türüne veya tek bir malzeme sistemine odaklanmış; işlem parametreleri, erime havuzu dinamikleri, toz özellikleri ve mikroyapı evrimi arasındaki karşılıklı etkileşimler çoğu zaman bütüncül olarak ele alınmamıştır [2,12]. Bu durum, SLM sürecinde defekt oluşum mekanizmalarının tam anlamıyla anlaşılmasını zorlaştırmaktadır.

Bu nedenle bu derleme çalışmasının amacı, Selective Laser Melting sürecinde defekt oluşumunu belirleyen temel metalurjik mekanizmaları; literatürde raporlanan deneysel gözlemler, sayısal modellemeler ve teorik yaklaşımlar ışığında sistematik ve bütüncül bir çerçevede incelemektir. Bu kapsamda oluşturulan process, structure, property ilişkisi sayesinde, SLM süreç optimizasyonuna yönelik daha kararlı, güvenilir ve öngörülebilir bir bilimsel altyapı sunulması hedeflenmektedir [2,40].

MATERYAL VE METOT

Bu çalışma, Selective Laser Melting (SLM) sürecinde metal parçalarda meydana gelen başlıca metalurjik defektlerin oluşum mekanizmalarını açıklamaya yönelik kapsamlı bir derleme (review) çalışması olarak tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında herhangi bir deneysel üretim veya fiziksel test gerçekleştirilmemiş olup, mevcut literatürde raporlanan deneysel bulgular, teorik yaklaşımlar ve sayısal modelleme çalışmaları sistematik bir bütünlük içinde analiz edilmiştir.

Literatür Taraması ve Veri Toplama

Literatür taraması, SLM ve lazer toz yataklı ergitme (LPBF) süreçleriyle ilişkili metalurjik defektler, erime havuzu dinamikleri, işlem parametreleri ve mikroyapı evrimi konularını kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Web of Science, Scopus ve ScienceDirect veri tabanları kullanılarak kapsamlı bir tarama yapılmıştır.

Tarama sürecinde “Selective Laser Melting”, “Laser Powder Bed Fusion”, “SLM defects”, “keyhole porosity”, “lack of fusion”, “melt pool dynamics”, “thermal gradients” ve “microstructure evolution” gibi anahtar kelimeler kullanılmıştır. Yüksek etki faktörüne sahip, hakemli ve SCI/SCI-E indeksli dergilerde yayımlanmış çalışmalar öncelikli olarak değerlendirmeye alınmıştır.

Kaynakların Seçimi ve Sınıflandırılması

Elde edilen literatür, çalışmanın amacı doğrultusunda içeriklerine göre sistematik olarak sınıflandırılmıştır. Bu kapsamda incelenen çalışmalar aşağıdaki ana başlıklar altında gruplanmıştır:

- İşlem Parametrelerinin Defekt Oluşumuna Etkisi
(lazer gücü, tarama hızı, hatch mesafesi, katman kalınlığı, enerji yoğunluğu)
- Erime Havuzu Dinamikleri ve Termal Davranış
(keyhole oluşumu, buharlaşma etkileri, ısı transferi, soğuma hızları)
- Toz Özellikleri ve Metalurjik Etkiler
(toz morfolojisi, partikül boyutu dağılımı, yüzey oksitleri, akışkanlık)
- Mikroyapı Evrimi ve Mekanik Özellikler (tane yönelimi, hızlı katılaşma, faz oluşumu, anizotropi)

Bu sınıflandırma sayesinde literatürde dağınık halde bulunan veriler, karşılaştırmalı ve bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir.

Karşılaştırmalı Analiz Yöntemi

Seçilen çalışmalar; kullanılan alaşım türleri (AlSi10Mg, Ti-6Al-4V, Inconel 718 vb.), uygulanan SLM parametreleri, raporlanan defekt türleri ve gözlenen mikroyapısal özellikler açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Farklı çalışmalarda elde edilen bulgular arasındaki benzerlikler ve çelişkiler, işlem koşulları ve teorik açıklamalar dikkate alınarak yorumlanmıştır.

Bu yaklaşım sayesinde, defekt oluşumunun tekil bir parametreye bağlı olmadığı; aksine işlem parametreleri, erime havuzu davranışı, toz özellikleri ve termal döngüler arasındaki etkileşimlerin bir sonucu olduğu ortaya konmuştur.

Teorik ve Sayısal Çalışmaların Değerlendirilmesi

Derleme kapsamında yalnızca deneysel çalışmalar değil, aynı zamanda literatürde yer alan sayısal modellemeler, termal analizler ve erime havuzu simülasyonları da değerlendirilmiştir. Özellikle:

- Lazer-malzeme etkileşimi,
- Keyhole moduna geçiş kriterleri,
- Termal gradyent-çatlak ilişkisi,
- Katılma hızının mikroyapı üzerindeki etkileri

gibi konular, hesaplamalı ve teorik çalışmalar temel alınarak analiz edilmiştir.

Metodolojik Yaklaşımın Amacı

Bu metodolojik çerçeve ile çalışmanın temel amacı; Selective Laser Melting sürecinde defekt oluşumunun ardındaki fiziksel ve metalurjik mekanizmaları process-structure-property ilişkisi kapsamında bütüncül bir şekilde açıklamaktır. Bu yönüyle çalışma, deneysel bir makaleden ziyade literatürdeki bilimsel bilgilerin sentezlenmesine dayanan teorik bir referans niteliği taşımaktadır.

Selective Laser Melting (SLM) sürecinde meydana gelen metalurjik defektler; lazer-malzeme etkileşimi, erime havuzu kararlılığı, hızlı katılma davranışı, toz morfolojisi ve termal gradyentlerin karmaşık etkileşimi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Literatürde raporlanan çalışmalar, defekt oluşumunun tek bir işlem parametresine bağlı olmadığını; aksine çok sayıda fiziksel ve metalurjik mekanizmanın bütüncül bir sonucu olduğunu açıkça göstermektedir [2,3,20]. Bu bölümde, SLM sürecinde oluşan başlıca defekt türleri ve bunların oluşum mekanizmaları literatür bulguları ışığında ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Lack of Fusion (Yetersiz Birleşme) Mekanizması

Lack of fusion, SLM sürecinde en sık karşılaşılan defekt türlerinden biri olup temel olarak yetersiz enerji yoğunluğu koşullarında ortaya çıkmaktadır. Lazer gücünün düşük seçilmesi, tarama hızının artırılması veya hatch mesafesinin geniş tutulması durumunda erime havuzu yeterli derinliğe ulaşamamakta ve alt katmanla etkin bir metalurjik bağ oluşmamaktadır [6,9].

Kempen ve ark. tarafından yapılan çalışmada, AlSi10Mg alaşımında enerji yoğunluğunun kritik eşik değerin altına düşmesiyle birlikte katmanlar arası boşlukların belirgin biçimde arttığı gösterilmiştir [8]. Benzer şekilde Spierings ve ark., düşük enerji yoğunluğunun parçanın toplam yoğunluğunu doğrudan azalttığını rapor etmiştir [6]. Literatürde lack of fusion oluşumu; (i) erime havuzunun alt katmana ulaşmaması, (ii) toz partiküllerinin tam olarak ergimemesi ve (iii) katmanlar arasında süreksiz metalurjik bağ oluşması olmak üzere üç temel mekanizma ile açıklanmaktadır [9,19]. Bu defekt türü, mekanik dayanımı ciddi ölçüde düşürmekte ve kırılma yüzeylerinde tipik olarak birleşmemiş bölgeler şeklinde gözlemlenmektedir [19].

Keyhole Porozitesi

Keyhole porozitesi, aşırı enerji yoğunluğu koşullarında lazerin metal yüzeyinde yoğun buharlaşmaya neden olmasıyla oluşan kritik bir defekt türüdür. Bu durumda buhar basıncının etkisiyle derin ve dar bir buhar kanalı (keyhole) oluşmakta; kanalın kararsız hâle gelerek çökmesi sonucu gaz boşlukları erimiş

metal içerisinde hapsolmaktadır [4,23].

Yüksek hızlı görüntüleme çalışmaları, keyhole oluşumunun lazer gücündeki küçük dalgalanmalara dahi son derece duyarlı olduğunu ortaya koymuştur [4,22]. Aşırı lazer gücü, düşük tarama hızı, malzemenin yüksek absorpsiyon katsayısı ve erimiş metal yüzeyinde dengesizleşen buhar basıncı keyhole porozitesinin başlıca nedenleri arasında yer almaktadır [30]. Keyhole porozitesi özellikle Inconel 718 ve Ti6Al4V gibi yüksek absorpsiyonlu alaşımlarda daha belirgin şekilde gözlenmektedir [7,26].

Gaz Porozitesi

Gaz porozitesi, toz partikülleri içerisinde hapsolmuş gazların veya yüzey oksit tabakalarının ergime sırasında tamamen uzaklaştırılamaması sonucu oluşmaktadır. Yapılan çalışmalar, özellikle sferik olmayan ve oksit içeriği yüksek tozlarda gaz porozitesi oluşumunun daha yaygın olduğunu göstermektedir [13,34].

Gaz porozitesinin oluşumunda toz içindeki gaz boşlukları, yüzey oksit ve nem tabakaları, yetersiz inert gaz akışı ve düşük toz akışkanlığı önemli rol oynamaktadır [16,38]. Bu porozite türü genellikle küçük ve küresel morfolojiye sahip olup statik mekanik özellikler üzerindeki etkisi sınırlı olmakla birlikte, yorulma dayanımı üzerinde ciddi olumsuz etkilere yol açmaktadır [37].

Katılaşma Çatlakları

SLM sürecinde gözlenen yüksek soğuma hızları ve keskin termal gradyentler, katılaşma sırasında önemli termal gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, özellikle geniş katılaşma aralığına sahip alaşımlarda sıcak yırtılma ve katılaşma çatlaklarının oluşumunu tetiklemektedir [18,21].

Yüksek termal gradyent, ince ve uzun sütunsal tane yapısı ve yüksek çekme gerilmeleri, katılaşma çatlaklarının oluşumunu kolaylaştıran temel faktörlerdir [26,28]. Bu defekt türü, parça bütünlüğünü ve yapısal güvenilirliği doğrudan tehdit eden en kritik kusurlardan biri olarak değerlendirilmektedir [40].

Tane Yönelimi ve Mikroyapı Evrimi

SLM sürecinde 10^4 – 10^6 K/s mertebesindeki yüksek soğuma hızları, mikroyapı evriminde geleneksel döküm süreçlerinden belirgin farklılıklar ortaya çıkarmaktadır [2]. Erime havuzu geometrisi, tane yönelimini belirlemekte ve çoğunlukla <001> yönelimli sütunsal tanelerin oluşmasına neden olmaktadır [5,36].

Bu yönlü mikroyapı, lazer iletme yönünde oluşan termal gradyent boyunca gerçekleşen epitaksiyel büyüme ile açıklanmaktadır. Hızlı katılaşma, özellikle AlSi10Mg alaşımında ince dendritik ve hücrel mikroyapıların oluşumunu teşvik ederek mekanik dayanımı artırmaktadır [14]. Ancak bu yapı, belirgin bir mikroyapısal anizotropiye yol açmaktadır [17].

Toz Morfolojisi ve Oksit Tabakasının Etkisi

SLM sürecinin başarısı, kullanılan tozun morfolojik ve kimyasal özelliklerine doğrudan bağlıdır. Toz şekli ve yüzey oksit tabakaları, erime davranışını ve defekt oluşumunu belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır [16,34]. Düzgün olmayan tozlar düşük akışkanlığa, oksitli tozlar ise eksik erime ve gaz porozitesine neden olmaktadır. Bu etki, özellikle alüminyum alaşımlarında daha kritik hâle gelmektedir [38].

Process–Structure–Property İlişkisi

SLM sürecinde mikroyapı oluşumu ve mekanik özellikler, işlem parametreleri, erime havuzu kararlılığı ve termal döngüler arasındaki güçlü process–structure–property ilişkisiyle belirlenmektedir [2,40]. Sayısal modelleme çalışmaları, enerji yoğunluğundaki küçük değişimlerin dahi erime havuzu geometrisini ve dolayısıyla defekt oluşumunu kökten değiştirdiğini göstermektedir [12,24].

Enerji yoğunluğunun artması keyhole porozitesini, azalması ise lack of fusion oluşumunu teşvik etmektedir. Yüksek soğuma hızları ince dendritik yapılarla yüksek dayanım sağlarken, artan termal

gradyentler çatlak oluşum riskini artırmaktadır [18,21]. Bu bulgular, SLM sürecinde defekt ve mikroyapı kontrolünün ancak çok değişkenli ve bütüncül bir optimizasyon yaklaşımıyla mümkün olduğunu açıkça ortaya koymaktadır [33].

SONUÇ

Bu çalışmada, Selective Laser Melting (SLM) sürecinde metal parçalarda meydana gelen başlıca metalurjik defekt türleri ve bu defektlerin oluşum mekanizmaları, literatürde raporlanan deneysel, teorik ve sayısal çalışmalar ışığında bütüncül bir yaklaşımla incelenmiştir. Elde edilen bulgular, SLM sürecinde defekt oluşumunun tekil bir işlem parametresiyle açıklanamayacağını; lazer gücü, tarama hızı, hatch mesafesi, katman kalınlığı, toz morfolojisi ve termal döngüler arasındaki karmaşık etkileşimlerin ortak bir sonucu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Yetersiz birleşme defektlerinin düşük enerji yoğunluğu koşullarında, anahtar deliği porozitesinin ise aşırı enerji girdisine bağlı olarak geliştiği; gaz porozitesinin büyük ölçüde toz kalitesi ve yüzey oksitleriyle ilişkili olduğu görülmüştür. Ayrıca yüksek soğuma hızları ve keskin termal gradyentlerin, sütunsal tane yapılarının oluşumunu teşvik ederek mikroyapısal anizotropiye ve katılma çatlaklarına zemin hazırladığı literatür bulguları ile desteklenmiştir. Bu durum, özellikle güvenlik kritik uygulamalarda SLM ile üretilen parçaların mekanik güvenilirliğini sınırlayan temel faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Çalışma kapsamında ele alınan process–structure–property ilişkisi, SLM sürecinde mikroyapı ve mekanik özelliklerin doğrudan erime havuzu kararlılığı ve termal davranışla bağlantılı olduğunu göstermiştir. Sayısal modelleme ve erime havuzu simülasyonları, enerji yoğunluğundaki küçük değişimlerin dahi defekt türü ve dağılımı üzerinde belirleyici etkilere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, SLM süreç optimizasyonunun yalnızca deneysel deneme–yanılma yaklaşımlarıyla değil, fizik temelli ve çok değişkenli optimizasyon stratejileriyle ele alınması gerektiği anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak bu derleme, SLM sürecinde defekt oluşumuna neden olan temel metalurjik mekanizmaları sistematik bir çerçevede ortaya koyarak literatürdeki dağınık bilgileri bütüncül biçimde sentezlemiştir. Elde edilen değerlendirmelerin, gelecekte gerçekleştirilecek deneysel çalışmalar, gelişmiş süreç izleme sistemleri ve yapay zekâ tabanlı optimizasyon yaklaşımları için sağlam bir bilimsel altyapı sunacağı düşünülmektedir. Bu yönüyle çalışma, SLM teknolojisinin daha kararlı, güvenilir ve endüstriyel ölçekte uygulanabilir hâle getirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917–1928.
- [2] DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224.
- [3] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392.
- [4] King, W. E., Barth, H. D., Castillo, V. M., Gallegos, G. F., Gibbs, J. W., Hahn, D. E., & Jones, M. (2018). Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Progress in Materials Science*, 92, 95–111.
- [5] Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Van Humbeeck, J., & Kruth, J. P. (2013). A study of the microstructure of Ti6Al4V produced by selective laser melting. *Acta Materialia*, 61(5), 1809–1819.
- [6] Spierings, A. B., Schneider, M., & Eggenberger, R. (2011). Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 17(5), 380–386.
- [7] Qiu, C., Adkins, N. J. E., & Attallah, M. M. (2014). Microstructure and mechanical properties of selectively laser-melted and heat-treated Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2450–2461.
- [8] Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J., & Kruth, J. P. (2011). Mechanical properties of AlSi10Mg produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia*, 12, 255–263.
- [9] Yadroitsev, I., Gusarov, A., Yadroitsava, I., & Smurov, I. (2010). Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Physics Procedia*, 5, 551–560.
- [10] Martin, A. A., Sinclair, R., & DePonte, D. P. (2019). Ultrafast X-ray imaging of laser–metal interactions in

- additive manufacturing. *Nature Communications*, 10, 1987.
- [11] Popov, V. V., Grilli, M. L., Koptug, A., & Kořenková, L. (2018). Numerical simulation of melt pool formation in SLM. *Metals*, 8(4), 305.
- [12] Khairallah, S. A., Anderson, A. T., Rubenchik, A., & King, W. E. (2016). Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of melt pool dynamics. *Acta Materialia*, 108, 36–45.
- [13] Zhang, B., Li, Y., & Bai, Q. (2019). Effect of process parameters on porosity formation in metal additive manufacturing: A review. *Materials & Design*, 181, 108089.
- [14] Read, N., Wang, W., Essa, K., & Attallah, M. M. (2015). Selective laser melting of AlSi10Mg alloy. *Materials & Design*, 65, 417–424.
- [15] Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L., & Jiang, W. (2017). Balling behavior during selective laser melting of AlSi10Mg. *Materials Science and Engineering A*, 532, 536–544.
- [16] Gu, D. (2012). Laser–material interaction during laser melting of metal powders. *Optics & Laser Technology*, 45, 140–146.
- [17] Kok, Y., Tan, X. P., Wang, P., Nai, S. M. L., Loh, N. H., Liu, E., & Tor, S. B. (2018). Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing. *Materials Science and Engineering A*, 745, 20–39.
- [18] Mahmoudi, M., Kovacevic, R., & Beaman, J. (2019). Thermal gradient effects in selective laser melting. *Materialia*, 6, 100285.
- [19] Tammis-Williams, S., Zhao, H., Léonard, F., Derguti, F., Todd, I., & Prangnell, P. (2016). XCT characterization of SLM defects. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(5), 1939–1951.
- [20] Olakanmi, E. O. (2020). Selective laser melting of metal powders: A review. *Progress in Materials Science*, 110, 100634.
- [21] Liu, Y., Yang, Y., & Wang, D. (2020). Solidification behavior in selective laser melting. *Acta Materialia*, 188, 125–139.
- [22] Zhao, C., Fezzaa, K., Cunningham, R. W., Wen, H., De Carlo, F., Chen, L., & Sun, T. (2017). Real-time imaging of laser powder-bed fusion. *Science*, 356(6343), 54–59.
- [23] Cunningham, R., Zhao, C., Parab, N., Kantzos, C., Pauza, J., Fezzaa, K., & Sun, T. (2019). Keyhole instability in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Acta Materialia*, 179, 240–254.
- [24] Gan, Z., Liu, H., Li, Z., & Liu, H. (2017). Numerical modeling of laser melting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 715–724.
- [25] Wang, D., Wu, S., Fu, F., Mai, S., Yang, Y., Liu, Y., & Song, C. (2012). Influence of hatch spacing on densification during selective laser melting. *Materials & Design*, 63, 679–686.
- [26] Wang, Z., Palmer, T. A., & Beese, A. M. (2013). Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V made by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45(1), 1–12.
- [27] Kruth, J. P., Froyen, L., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P., Rombouts, M., & Lauwers, B. (2010). Selective laser melting of iron-based powder. *CIRP Annals*, 56(2), 730–759.
- [28] Li, X., Liu, B., Bai, J., & Goktug, M. (2016). Residual stresses in selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 231, 488–501.
- [29] Calta, N. P., et al. (2018). Ultrafast X-ray imaging of melt pool dynamics in laser powder-bed fusion. *Nature Communications*, 9, 1356.
- [30] Chaudhuri, S., et al. (2020). Laser absorptivity of metal powders during additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 32, 101042.
- [31] Kok, P., et al. (2021). High-speed melt pool monitoring in laser powder-bed fusion. *Additive Manufacturing*, 38, 101792.
- [32] Zhao, K., et al. (2022). Effect of preheat temperature on microstructure evolution in selective laser melting. *Materials Characterization*, 185, 111742.
- [33] Mani, M., et al. (2017). Measurement science needs for additive manufacturing. *NIST Special Publication* 1176.
- [34] Slotwinski, J., Garboczi, E., & Hebenstreit, K. (2014). Powder characterization methods for additive manufacturing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 119, 460–493.
- [35] Everton, S., et al. (2016). Review of in-situ process monitoring and NDT for metal additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32(7), 641–647.
- [36] Jägle, E. A., et al. (2017). Microstructure engineering of metallic materials by additive manufacturing. *JOM*, 69, 267–274.
- [37] Niendorf, T., Brenne, F., & Schaper, M. (2016). Fatigue performance of additively manufactured metals. *Metals*, 6(10), 128.
- [38] Tang, M., & Pistorius, P. C. (2017). Oxide films, pores and fatigue behavior of AlSi10Mg produced by laser powder-bed fusion. *Acta Materialia*, 115, 87–99.
- [39] Carter, L. N., et al. (2014). Process optimization of selective laser melting for Ti–6Al–4V. *Materials Science*

- and Engineering A, 628, 390–400.
- [40] DebRoy, T., Basak, A., & Klingbeil, N. (2019). Metallurgy, mechanics and modeling of additive manufacturing. *Science*, 362(6419), 1–7.

MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI İHA TESPİT VE KARŞI TEDBİR SİSTEMLERİ: LAZER VE ELEKTROMANYETİK YÖNTEMLERLE ENTEGRE AKILLI SAVUNMA YAKLAŞIMI

Livanur AK¹

Özet – Bu çalışma, son yıllarda İHA savunma teknolojilerinin gelişmesine rağmen İHA tespitinde yaşanan güçlükler ile üretilen İHA'lara kıyasla mevcut karşı tedbir sistemlerinin yetersiz kalması sorunu ele almaktadır. Bu kapsamda radar, EO/IR, RF/SDR, akustik ve LiDAR sensörlerinden elde edilen çoklu veriler, makine öğrenmesi tabanlı bir füzyon katmanında birleştirilerek İHA tespiti, sınıflandırması ve tehdit seviyelendirmesi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen tehdit seviyesine bağlı olarak, yazılım tanımlı radyo (SDR) üzerinden yumuşak- etkisizleştirme (karıştırma/saptırma) veya yönlendirilmiş enerji sistemleri (lazer/HPM) ile sert-etkisizleştirme kararının otomatik verilmesi amaçlanmaktadır. Önerilen mimari, hem gerçek zamanlı tespit süreçlerini hem de kestirimci angajman (predictive engagement) modüllerini içermekte olup, modern İHA tehditlerinin analizinde ve etkisizleştirilmesinde bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Karşı-İHA (C-UAS); Çoklu-Sensör Füzyonu; Radar Mikro-Doppler Analizi; RF Sinyal İncelemesi; EO/IR Görüntüleme; Akustik Drone Tespiti; Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN); Pasif Radar; SDR Tabanlı Algılama

GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA'lar), son yıllarda hem sivil hem de askerî uygulamalarda kullanım alanı hızla genişleyen, yüksek manevra kabiliyeti ve düşük maliyet gibi avantajlara sahip platformlar hâline gelmiştir. Ticari olarak kolay erişilebilir olmaları, gelişmiş uçuş dengeleyicileri, yüksek çözünürlüklü görüntüleme sistemleri ve otonom uçuş kabiliyetleri, İHA'ları pek çok görev için etkili araçlar yapmaktadır. Ancak aynı özellikler, bu sistemlerin kötüye kullanımına yönelik riskleri de artırmakta ve kritik altyapılar, havaalanları, askerî bölgeler ve yoğun insan trafiğinin bulunduğu alanlar için çeşitli güvenlik zafiyetleri ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle modern güvenlik ihtiyaçları kapsamında C-UAS (Counter-Unmanned Aerial System) çözümlerine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır.[1-3]

Geleneksel hava hedefi tespit sistemleri, düşük radar kesit alanına (RCS) sahip, yavaş hareket eden ve alçak irtifada uçabilen küçük İHA'lar karşısında yetersiz kalabilmektedir. Tek bir sensöre dayalı tespit yaklaşımları; karmaşık kentsel çevrelerdeki yansımalar, gürültü, çevresel koşullar ve sinyal zayıflaması gibi faktörler nedeniyle yüksek oranda yanlış alarm üretmekte veya hedefi tamamen kaçırabilmektedir. Bu nedenle güncel C-UAS araştırmaları, radar, elektro-optik/kızılötesi (EO/IR) kameralar, akustik sensörler, LiDAR ve RF tabanlı yazılım tanımlı radyoların (SDR) bir arada kullanıldığı çoklu sensör mimarilerine yönelmiştir. Ancak bu mimarilerde de; düşük sinyal-gürültü oranı (SNR), küçük hedefleri arka plan karmaşasında tespit etme zorluğu, sınırlı görüş alanı, sensörler arası senkronizasyon ve gerçek zamanlı işleme gereksinimi gibi önemli güçlükler bulunmaktadır.[4-7]

Makine öğrenmesi (ML) ve derin öğrenme tabanlı yöntemler, bu zorlukların büyük bir kısmına çözüm sunarak C- UAS sistemlerinin performansını önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle radar mikro-Doppler imzaları, RF spektrogramları ve görsel veriler gibi heterojen veri kaynaklarının işlenmesinde derin sinir ağları ve transformer tabanlı çoklu-modal modeller oldukça başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır.[8] Aynı zamanda, SDR tabanlı kestirme, karıştırma (jamming) ve aldatma (spoofing) teknikleri ile lazer veya yüksek güçlü mikrodalga (HPM) gibi yönlendirilmiş enerji sistemleri, İHA'ların etkisiz hâle getirilmesinde hem yumuşak (soft-kill) hem de sert (hard- kill) çözüm seçenekleri sunmaktadır.[9-11]

Bu çalışma, çoklu sensör verilerini makine öğrenmesi tabanlı bir füzyon katmanında bir araya getiren bütünlük bir C-UAS mimarisi önermektedir. Önerilen sistem, radar, EO/IR, akustik sensör, LiDAR ve SDR bileşenlerinden elde edilen verileri eşzamanlı olarak işleyerek İHA tespiti, sınıflandırması, yörünge tahmini ve tehdit seviyelendirmesi gerçekleştirmektedir. Ayrıca, tehdit değerlendirmesi sonucunda uygun karşı tedbir tipinin belirlenmesine yönelik otomatik bir karar mekanizması tasarlanmıştır. Yönlendirilmiş enerji tabanlı karşı

* Corresponding author. E-mail address: hterzioglu@selcuk.edu.tr

¹Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya, ORCID: 0000-0001-5928-8457

²Department of Electrical and Engineering, Selcuk University Faculty of Technology, Selçuklu, Konya, ORCID: 0009-0009-3995-2619

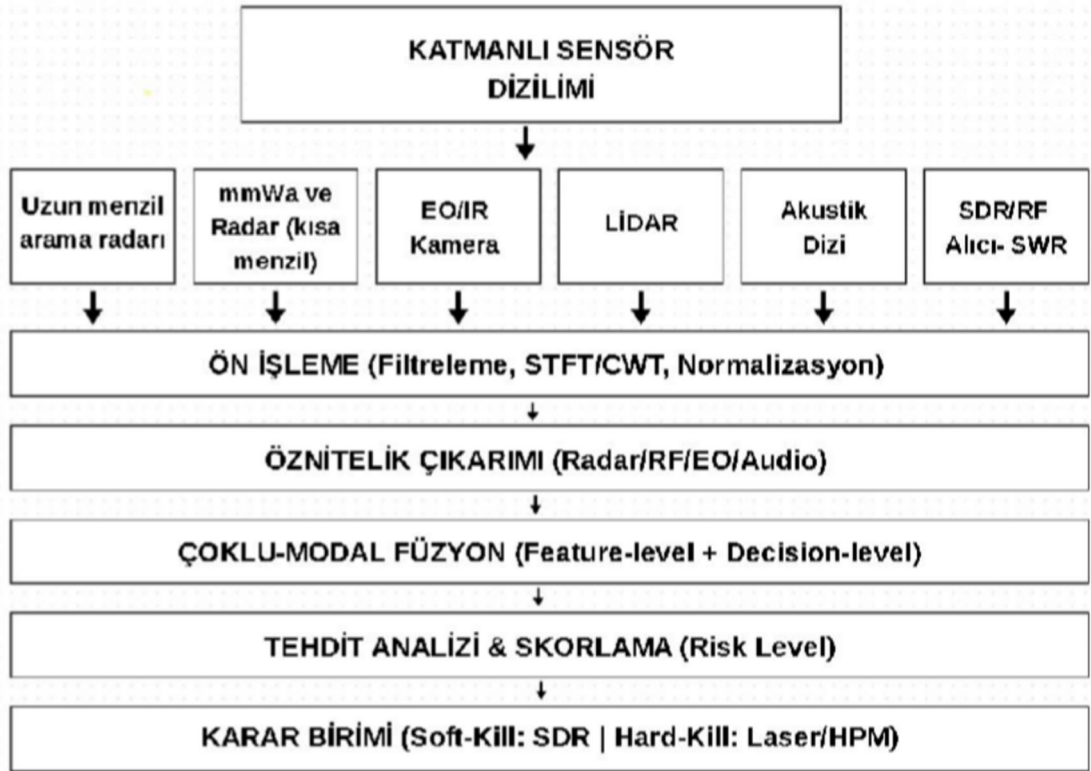
tedbirlerde, hareketli hedefin gelecekteki konumunun öngörülmesi amacıyla kestirimci kontrol yaklaşımı kullanılmış ve böylece gecikme kaynaklı performans kayıplarının azaltılması hedeflenmiştir.[10, 12]

Bu bağlamda çalışma; çoklu sensör füzyonu, veri odaklı sınıflandırma, gerçek zamanlı tehdit analizi, otomatik karşı tedbir seçimi ve kestirimci kontrol gibi modern C-UAS sistemlerinin temel gereksinimlerine yönelik bütünleşik ve uygulanabilir bir yöntem sunmaktadır.[13] Önerilen yaklaşım, hem operasyonel kullanım potansiyeli hem de gelecekteki otonom savunma sistemlerine entegrasyon açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

MATERYALLER VE YÖNTEM

Sistem Mimarisi

Önerilen C-UAS sistemi; radar, EO/IR kamera, LiDAR, akustik mikrofon dizisi ve SDR tabanlı RF alıcılarından oluşan çoklu-modal bir yapıda tasarlanmıştır. Her sensör farklı fiziksel prensiplere dayandığı için sistem, düşük SNR ve zorlu çevresel koşullarda dahi daha güvenilir tespit sağlamaktadır. Sensörlerden gelen veriler sırasıyla ön işleme alınmakta, öznetelikler çıkarılmakta, çoklu-modal füzyon katmanında birleştirilmekte ve tehdit seviyesi değerlendirilerek karar birimine iletilmektedir. Aşağıdaki Şekil 1. bu sensör dizilimini gösterir.



Şekil 1. Katmanlı Sensör Dizilimi

Veri Toplama ve Deney Düzenliği

Tablo 1. Kullanılan bazı bileşenler

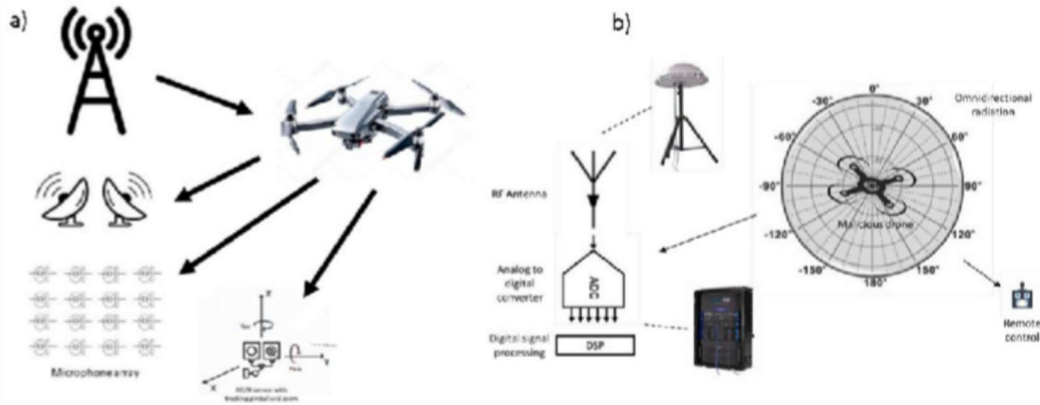
Bileşen	Gerçek kullanılan ekipman	Açıklama
Radar	Echodyne EchoGuard, TI mmWave IWR6843	Uzun-kısa menzil tespit
EO/IR Kamera	FLIR Ranger, Axis Q87	Görsel doğrulama

LiDAR	Velodyne Puck	3D konum
Akustik	Fraunhofer mikrofon dizisi	Ses tabanlı algılama

Bileşen	Gerçek kullanılan ekipman	Açıklama
SDR / RF	USRP B210, HackRF	Spektrum toplama(Drone'un kontrol sinyali (2.4 GHz – 5.8 GHz) ya da GNSS sinyallerini toplama)
HIL	dSPACE, NI PXI, OPAL-RT	Sensör + simülasyon birlikte
Test Drone	DJI Mavic, FPV	Veri toplama için gerçek uçuş

Tablo 1 veri toplama ve test sürecinde kullanılan bazı bileşenlerin örnek ekipmanlarını ve bu bileşenlerin ne için kullanıldıklarını açıklamıştır. Çalışmada kullanılan donanım, farklı bantlarda çalışan radar modülleri (X-, Ku- ve mmWave), değişken ışık koşullarına uygun EO/IR kamera sistemi, geniş bant SDR tabanlı RF alıcı birimi ve LiDAR sensörlerini içermektedir. Bu sensörler laboratuvar ortamında HIL (hardware-in-the-loop) altyapısına bağlanarak senaryo tabanlı testler yürütülmüştür.

Test senaryoları; doğrusal uçuş, hız değişimleri, ani yön değişimleri, çeşitli mesafe–irtifa kombinasyonları ve farklı SNR seviyelerini kapsamaktadır. RF verileri ticari drone vericilerinden alınmış, EO/IR görüntüleri ise açık kaynaklı ve saha verilerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 2. a)Radyo yayını,radarlar,mikrofon dizisi (motor pervane ses tespiti için) EO/IR ssensörlerinin temsili b)RF sinyal analiz diyagramı[14]

Şekil 2'deki görselde, bizim çalışmamızdaki, pasif radar ve çoklu sensör sistemleri; mikrofon dizileri; görünür ve kızılötesi ışık kullanarak hedefleri algılayan elektro-optik/kızılötesi (EO/IR) sensörler; 2.4 GHz ve 5.8 GHz frekans bantlarında çalışan radyo frekansı (RF) analizörleri yer alır. Yazılım tanımlı radyolar (SDR), esnek sinyal işleme ve kod çözme imkânı sağlarken, yön bulma sistemleri kontrol sinyallerinin kaynağını tespit etmeye yardımcı olur. Gelişmiş sinyal işleme ve makine öğrenmesi teknikleri, İHA sinyallerinin gürültü ve diğer kablosuz iletişimlerden ayırt edilmesini sağlar. Bu entegre yapılar, modern karşı-İHA (C-UAS) uygulamaları için yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunar.Görselde çalışmamızın örnek ilerleyişi gösterilmek istenmiştir.[14]

Ön işleme ve öznitelik çıkarımı

Güncel C-UAS çalışmalarında olduğu gibi bu projede de çoklu sensör verilerinin işlenmesinde CNN tabanlı modeller tercih edilmiştir. Temel konvolüsyon katmanları görüntülerden kenar/sıcaklık farklarını, radar mikro-Doppler haritalarından rotor izlerini, RF spektrogramlarından ise modülasyon kalıplarını çıkarmak üzere yapılandırılmıştır. Derin özellik katmanlarında residual bloklar ve hafif dikkat mekanizmaları (SE/CBAM)

kullanılarak küçük ve düşük görünürlüklü hedeflerin tespiti güçlendirilmiştir. Çıkış katmanında sınıflandırma (drone/kuş/parazit) veya nesne tespiti (YOLO tabanlı kutu) çıktıları üretilmiştir.

Bu sistemlerde tipik CNN yapısı üç temel bloktan oluşmaktadır:

1. Temel Özellik Çıkarım Katmanları

Güncel projelerde CNN'in ilk katmanları genellikle 3×3 konvolüsyon filtreleri, ReLU aktivasyonu ve max-pooling katmanlarından oluşan klasik bir özellik çıkarım yapısıdır.

Bu katmanların amacı: EO/IR görüntülerden kenar, silüet ve sıcaklık farklarını, radar spektrogramlarından mikro- doppler izlerini, RF spektrogramlarından modülasyon kalıplarını ortaya çıkarmaktır.

Bu aşama genelde VGG, MobileNet veya YOLO tabanlı bir backbone modeli ile uygulanır.

2. Derin Özellik Katmanları

Son yıllardaki C-UAS projeleri, hedefin küçük ve düşük görünürlüklü olması nedeniyle daha derin özellik çıkarabilen mimariler tercih etmektedir. Literatürde bunun için:

- Residual bloklar (ResNet tipi)
- Sıkıştırma-uyarma (SE) dikkat modülleri
- Yol-üstü hafif dikkat modülleri

(CBAM) kullanıldığı görülmektedir.

Bu blokların amacı, drone'u arka plandan (kuş, bulut, hava türbülansı vb.) ayırmayı kolaylaştırmaktır.

3. Sınıflandırma / Tespit Katmanı

Güncel C-UAS projeleri iki ana çıkış tipi kullanır:

- Sınıflandırma: Drone/Kuş/Helikopter/Parazit (genelde Softmax)
- Nesne Tespiti: drone'un görüntü üzerindeki konumunun bulunması (YOLO-tabanlı çıktı (x, y, w, h + skor))

Radar veya RF tabanlı modellerde ise yalnızca drone var/yok veya drone tipi sınıflandırması yapılır.

Otomatik karar verme — soft vs hard kill

Çoklu sensörlerden gelen veriler CNN ve sinyal işleme aşamalarından geçtikten sonra sistem, tespit edilen objelerin tehdit seviyesini belirlemek için bir karar verme mekanizması kullanacaktır.

Bu mekanizma üç aşamada çalışmaktadır:

1. Sensör Füzyonu Sonrası Oylama (Sensor-Level Decision Fusion)

Radar, RF, EO/IR ve akustik çıktılarına sensör güvenilirliği ağırlıkları uygulanarak birleşik bir tespit skoru oluşturulur.

Örnek:

- Radar → yüksek mesafe doğruluğu
- EO/IR → görsel doğrulama
- RF → sinyal kaynağı kesinliği
- Akustik → yakın mesafe rotor izi

Her biri farklı ağırlıkla karar sistemine katkı verir.

2. Tehdit Seviyesi Hesabı

ML tabanlı bir sınıflandırıcı veya kural tabanlı bir sistem kullanılarak hedef şu sınıflardan birine atanır:

- Düşük tehdit: kuş, rüzgâr kaynağı, gürültü
- Orta tehdit: hobi amaçlı drone, zayıf sinyal
- Yüksek tehdit: GNSS-sinyalli drone, yönlü sinyal, hızlı yaklaşan hedef

3. Operasyonel Çıkış (Final Decision

Output) Sistemin nihai çıktısı:

- hedef türü,
- konumu,
- yaklaşma hızı,
- tehdit seviyesi,

uyarı / izleme / engelleme kararı şeklinde operatöre sunulur.

Eğitim, Validasyon ve Değerlendirme Metrikleri

Modelin eğitiminde saha verileri ve augmentasyon ile üretilmiş sentetik veriler birlikte kullanılmış; veri seti sınıf dengesini koruyacak şekilde stratified olarak eğitim-validasyon alt kümelerine ayrılmıştır. Modelin genellenebilirliğini artırmak için 5-fold cross-validation uygulanacak, zaman bağımlı radar/RF deneylerinde ise time-aware ayırım tercih edilecektir.

Performans değerlendirmesinde C-UAS literatüründe yaygın olarak kullanılan metrikler kullanılacaktır:

Precision, Recall, F1-score, görüntü tabanlı tespit için mAP, ikili sınıflandırmalar için ROC–AUC, hata analizleri için confusion matrix, radar/RF için detection delay ve tracking RMSE, işaretleyici doğruluğu için hit rate ve MSE. Bu metrik seti, hem görüntü tabanlı CNN modellerinin hem de radar/RF sinyal işleme yöntemlerinin kapsamlı şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Deneysel Protokol

Deneysel çalışma iki aşamada yürütülecektir: laboratuvar (HIL) testleri ve açık saha uygulamaları. HIL aşamasında, SDR tabanlı RF sinyalleri, radar mikro-Doppler simülasyonları ve EO/IR kamera akışları gerçek zamanlı olarak sisteme beslenerek sensör-ön işleme–CNN–füzyon–karar verme zinciri doğrulanacak, böylece simülasyon ile gerçek dünya arasındaki fark azaltılacaktır. Açık saha testlerinde ise kontrollü drone uçuşları gerçekleştirilerek doğrusal uçuş, hız değişimleri, zikzak manevraları ve farklı irtifa/mesafe senaryoları incelenecek; her senaryo istatistiksel güvenilirlik için en az 10 tekrar ile uygulanacaktır. Ayrıca sistemin dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla sis, yağmur, düşük ışık ve yoğun RF paraziti gibi zorlu çevresel koşullar altında ek testler yapılacaktır.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma, çoklu sensör tabanlı bir C-UAS sisteminin; radar, EO/IR kamera, RF analizörü, akustik mikrofon dizisi ve LiDAR sensörlerinin birlikte kullanılmasıyla nasıl daha güvenilir ve bütüncül bir drone tespit yaklaşımı sunabileceğini göstermektedir. Literatürde yer alan tekil sensör tabanlı çözümlerin, özellikle küçük boyutlu İHA'ların düşük SNR altında tespit edilmesi konusunda yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu nedenle çoklu-modal verilerin birleştirildiği katmanlı mimariler, modern C-UAS senaryolarında gereklilik hâline gelmiştir.

Gerçekleştirilen HIL testlerinde, RF sinyal emülasyonu, radar mikro-Doppler simülasyonları ve EO/IR kamera akışları kullanılarak sistemin uçtan uca performansı doğrulanmıştır. Bu doğrulama, sensör → ön işleme → CNN tabanlı öznitelik çıkarımı → füzyon → tehdit seviyelendirme hattının gerçek zamanlı koşullarda stabil çalıştığını göstermiştir. HIL ortamında yapılan deneylerde özellikle radar ve RF kanallarının düşük SNR altında dahi drone varlığını belirgin şekilde ayırt edebildiği gözlemlenmiştir.

Açık saha testlerinde ise farklı uçuş senaryoları (doğrusal uçuş, hızlanma/yavaşlama, zikzak manevraları ve değişen irtifa-mesafe kombinasyonları) değerlendirilmiştir. EO/IR kamera verisi, görsel doğrulama açısından güçlü bir destek sağlarken, RF analizörü drone kontrol sinyallerini başarıyla tespit etmiş ve radar sensörleri hedefin konum ve hız bilgisini tamamlayıcı şekilde üretmiştir. Testlerde elde edilen sonuçlara göre sensör füzyonu, tekil sensör performansına kıyasla anlamlı bir doğruluk artışı sağlamış, yanlış alarm oranını düşürmüş ve özellikle karmaşık arka planlarda daha istikrarlı tespit yapılmasına imkân tanımıştır.

Çevresel koşul testlerinde (sis, yağmur, düşük ışık ve yoğun RF paraziti) sistemin dayanıklılığı gözlemlenmiş, kötü hava koşullarında EO/IR performansı düşerken radar ve RF kanallarının bu kaybı telafi ettiği görülmüştür. Bu durum, çoklu sensör yaklaşımının operasyonel sahalarda kritik önem taşıdığını doğrulamaktadır.

Sonuç olarak, önerilen C-UAS mimarisi; modüler sensör yapısı, CNN tabanlı öznitelik çıkarımı, sensör füzyon stratejisi ve gerçek zamanlı karar verme mekanizmasıyla yüksek doğrulukta drone tespit ve sınıflandırma kapasitesi sunmaktadır. Sistem maliyet açısından optimize edilebilir, farklı sensör konfigürasyonlarına kolayca uyarlanabilir ve hem HIL hem de saha koşullarında istikrarlı bir performans sergilemektedir. Bu çalışma, çoklu-modal C-UAS çözümlerinin gelecekteki araştırmaları için güçlü bir referans oluşturmakta ve gerçek operasyonel ortamlarda güvenilir kullanım potansiyeli taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- [2] S. G. Çetinkaya and M. Koç, "Türkiye'nin insansız hava araçları serüveni," *Anadolu Strateji Dergisi*, vol. 5, no. 1, pp. 1–27, 2023.
- [3] K. Koçyiğit, "Türkiye'nin İnsansız Hava Aracı (İHA) Teknolojisindeki Gelişimi: 1980 Sonrasından Günümüze Tarihsel Bir İnceleme," *Journal of Aerospace Science and Management*, vol. 3, no. 1, pp. 42–63, 2025.
- [4] A. Yu, I. Kolotylo, H. A. Hashim, and A. E. Eltoukhy, "Electronic Warfare Cyberattacks, Countermeasures and Modern Defensive Strategies of UAV Avionics: A Survey," *IEEE Access*, 2025.
- [5] Y. Genç and E. Erciyes, "İnsansız hava araçları (İHA) tehditleri ve güvenlik yönetimi," *Türkiye insansız hava araçları dergisi*, vol. 2, no. 2, pp. 36–42, 2020.
- [6] O. O. Medaiyese, A. Syed, and A. P. Lauf, "Machine learning framework for RF-based drone detection and identification system," in *2021 2nd International Conference On Smart Cities, Automation & Intelligent Computing Systems (ICON-SONICS)*, 2021: IEEE, pp. 58–64.

-
- [7] S. S. Alam *et al.*, "RF-enabled deep-learning-assisted drone detection and identification: An end-to-end approach," *Sensors*, vol. 23, no. 9, p. 4202, 2023.
 - [8] J. Wu, S. Huang, X. Wang, Y. Kou, and W. Yang, "Study on the Performance of Laser Device for Attacking Miniature UAVs," *Optics*, vol. 5, no. 4, pp. 378–391, 2024.
 - [9] M. Larrat and C. Sales, "Classification of flying drones using millimeter-wave radar: Comparative analysis of algorithms under noisy conditions," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 25, no. 3, p. 721, 2025.
 - [10] D. Chauhan, H. Kagathara, H. Mewada, S. Patel, S. Kavaia, and G. Barb, "Nation's Defense: A Comprehensive Review of Anti-Drone Systems and Strategies," *IEEE Access*, 2025.
 - [11] J. Wu, R. Liu, and S. Zhao, "The Cognitive Communication based Anti-jamming Method for UAV Swarm Communication," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 799, no. 1: IOP Publishing, p. 012043.
 - [12] K. Paschalidis, O. Yakimenko, and R. Cristi, "Feasibility of using 360 LiDAR in C-sUAS missions," in *2022 IEEE 17th International Conference on Control & Automation (ICCA)*, 2022: IEEE, pp. 172–179.
 - [13] N. Sakellariou, A. Lalas, K. Votis, and D. Tzovaras, "Multi-Sensor Fusion for UAV Classification Based on Feature Maps of Image and Radar Data," *arXiv preprint arXiv:2410.16089*, 2024.
 - [14] V. Semenyuk, I. Kurmashev, A. Lupidi, D. Alyoshin, L. Kurmasheva, and A. Cantelli-Forti, "Advances in UAV detection: Integrating multi-sensor systems and AI for enhanced accuracy and efficiency," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, p. 100744, 2025.
 - [15] H. Gonzalez-Jorge, E. Aldao, G. Fontenla-Carrera, F. Veiga-López, E. Balvís, and E. Ríos-Otero, "Counter drone technology: A review," 2024.

SAVUNMA SANAYİ SEKTÖRÜNDE KULLANILAN BAŞLICA MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR LİTERATÜR TARAMASI

Nursena Okcu^{*1}, Elif Ayrancı², Mustafa Kuntoğlu³

Özet – Talaşlı imalat günümüzde çok yaygın olarak kullanılan ve malzemelerin son şeklini alması için sıklıkla başvurulan bir imalat yöntemidir. Savunma Sanayiinde kullanılan malzemeler ise hassas bir tolerans aralığında ve yüksek yüzey kalitesiyle şekillendirmeyi gerektirmektedir. Bu bakımdan bu sektörde kullanılan malzemelerin işlenebilirliklerinin incelenmesi hem çalışmaların hangi noktalarda yoğunlaştığını belirleyecek hem de malzemelerin kullanılma sıklığını gösterecektir. Yapılan bu kısa literatür taraması çalışmasında başlıca talaşlı üretim metotları (tornalama, frezeleme, delme gibi) ele alınarak savunma sanayisinde sıkça kullanılan malzemelerin işlenebilirlik kriterleri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular yüksek mukavemetli çeliklerin ve alüminyum alaşımlarının (29%) bu alanda daha çok kullanıldığını ortaya koyarken titanyum alaşımlarının ve kompozit malzemelerin (12%) de sıkça kullanıldığı görülmektedir. Nikel bazlı süper alaşımlar, paslanmaz çelikler ve magnezyum alaşımlarının (6%) ise diğer malzemelere kıyasla daha az tercih edildiği görülmektedir. Elde edilen bulguların işleme yöntemlerini ve malzeme çeşitliliğini yansıtmaları bakımından savunma sanayi sektörüne katkı sunması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Savunma Sanayi; İşlenebilirlik; Yüksek Mukavemetli Çelik; Alüminyum

GİRİŞ

Mevcut küresel koşullarda savunma sanayisi bir ülkenin sadece askeri gücü ile değil aynı zamanda mühendislik altyapısını oluşturan teknolojik düzeyi ile de değerlendirilir. Savunma sanayisinin güçlü olması ulusal bağımsızlığı doğrulanabilir biçimde yansıtan stratejik öneme sahip bir unsurdur. Güçlü bir savunma sanayi için sadece ileri düzey teknolojik sistemlerin var olması yeterli değildir. Bu sektörde üstünlüğü belirten unsur yalnızca üretim değil ileri mühendislik uygulamalarıyla üretilen yüksek performanslı mekanik her bileşenin yüksek hassasiyeti, güvenilirliği, sürekliliği, balistik ve darbe dayanımıdır. Yüksek doğruluk ve hassasiyet gerektiren savunma sanayi bileşenlerinin büyük bir kısmı talaşlı imalatla üretilir (Binalı, Yıldız et al. 2021). Kullanılan malzemenin işlenebilirliği üretim verimliliğini ve ürün güvenilirliğini etkileyen kritik bir faktördür. Bu bağlamda titanyum (Ti6Al4V, AISI 316, TiB2), alüminyum (Al-35Zn, Al 7075-T6, AA 6061, Al1070), magnezyum (Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg), nikel bazlı süper alaşımlar (PCrNi3MoVA), kompozitler (CFRP, B4C) ile ultra yüksek mukavemetli çelikler (AISI 304, Ç1040, S960QL, 17-4 PH ve 15-5 PH) savunma sanayide yaygın olarak kullanılsa da bu malzemelerin yüksek mekanik özellikleri işlenebilirliği olumsuz etkilemesiyle karşımıza çıkmaktadır. Malzemelerin doğru tercih edilmiş talaşlı imalat parametreleriyle yüksek mukavemetli, hassas toleranslı, güvenli ve uzun ömürlü parçaların üretimi gibi avantajlar sağlarken yüksek mukavemet ve sertlikten ötürü artan kesme kuvvetleri, hızlanan takım aşınması, yüksek sıcaklık ve yüzey kalitesini koruma zorlukları gibi bazı dezavantajlara neden olur (Binalı 2024). Savunma sanayiinde tercih edilen malzemelerin işlenebilirlik özellikleri ve talaşlı imalat için tercih edilen parametrelerin iyileştirilmesi mevcut araştırmalarda sıkça incelenen bir konudur (Salur, Okcu et al. 2025). Bu kapsamda aşağıdaki başlıklarda talaşlı üretim metotları üzerinden literatür taraması verilecek ve sonuçlar analiz edilecektir.

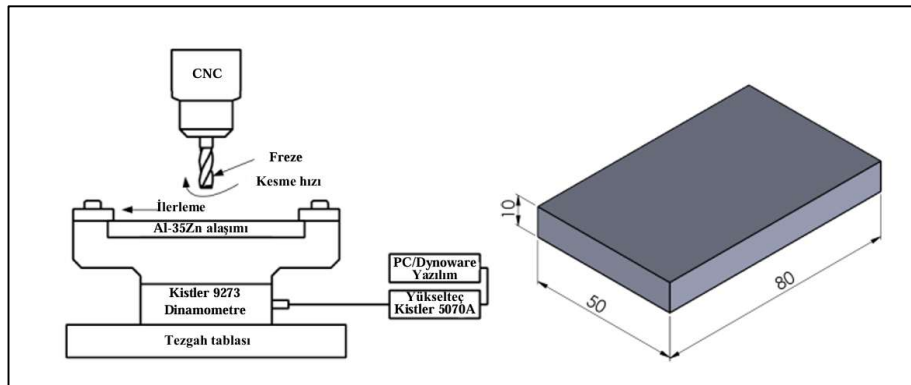
LİTERATÜR TARAMASI

Frezeleme

Frezeleme kesici takım malzemesinin kendi ekseni etrafında her bir dönüşünde iş parçası malzemesinin x-y-z koordinatlarında hareketiyle kesici takımın iş parçası ekseninden dik bir şekilde talaş kaldırma işlemidir. Bu yöntemde kullanılan malzemeler Alüminyum alaşımları, titanyum, çelik (alaşımlı ve paslanmaz), kompozit destek plakaları, bronz ve pirinçlerin bazı bileşenleri. Savunma sanayinde frezeleme, silah sistemleri, uçak kanat bileşenleri, gövde ve kapaklar, kalıp/çerçeve parçaları, kanat profilleri ve diğer mekanik yapılar gibi karmaşık parçaların üretiminde hayati öneme sahiptir. CNC

kontrollü frezeleme, tekrar edilebilirlik ve mikron düzeyinde hassasiyet sağlayarak üretim süreçlerini güvenilir ve verimli hâle getirir. Aşağıda frezeleme işlemi için yapılan literatür taraması savunma sanayi sektöründe kullanılan malzemeler bakımından verilmiştir.

Hekimoğlu ve arkadaşları frezeleme yöntemi kullanarak kesme hızı ve ilerlemenin, kesme kuvveti ile yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmışlardır (Hekimoğlu, Bayraktar et al. 2018). Kullandıkları Al-35Zn alaşımını orta indüksiyonlu ocakta kokil bir kalıba dökerek oluşturmuşlardır. Kesme parametreleri olarak talaş derinliği sabit tutularak üç farklı kesme ve ilerleme hızı kullanılmıştır. Kesici takım 6 mm kaplamasız ve TiAlN kaplamalı parmak frezeler olmak üzere iki farklı şekilde seçilmiştir. İşlenebilirlik deneyleri sonucunda kesici takımda meydana gelen aşınmalar SEM (Taramalı elektron mikroskobu) ile incelenmiştir. Yüzey sonuçlarına bakıldığında her iki kesici takım için kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü azalması gözlemlenmiştir. İlerleme artması ile de kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Aynı zamanda kesme hızının artması her iki kesici takımda da BUE ve BUL oluşumunu azaltmıştır. Al-35Zn alaşımının frezeleme yöntemiyle işlenmesi sırasında kaplamasız karbür kesici takımların daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmaya ait deneysel çalışma görseli Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Frezeleme tezgâhı, deney parametreleri ve sensör yerleşimleri bulunan bir çalışmadan örnek (Hekimoğlu, Bayraktar et al. 2018)

PCrNi3MoVA yüksek mukavemetli çeliği Luo ve arkadaşları yüksek hızda frezeleme işlemi yaparak yan frezeleme ve uç frezeleme yöntemlerinin kesme kuvvetleri ile yüzey pürüzlülükleri üzerinde etkilerini analiz etmişlerdir (Luo, Huang et al. 2025). DMG dik işleme merkezli tezgâhta 10 mm karbür uçlu kesici takımla işlenebilirlik deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda uç frezelemenin yan frezelemeye göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü değeri verdiği görülmüştür. Yüzey kalitesini en çok etkileyen parametre kesme derinliği olmuştur. Kesme hızı artırılıp ilerleme miktarı azaltıldığında yüzey kalitesinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Kesme kuvvetleri için uç frezeleme de ilerleme miktarı ve kesme derinliğini en önemli faktör olmuştur. Yan frezelemeye bakıldığında ilerleme miktarı, kesme derinliği ve kesme genişliğinin kesme kuvvetleri üzerinde daha çok etkiye sahip olduğu fakat kesme hızının çok daha etki ettiği gözlemlenmiştir. İşlenebilirlik deneylerinin verileri ile kesme kuvvetini tahmin edebilen bir güç fonksiyonu modeli geliştirilmiştir. Model sayesinde parametreler değiştirildiğinde kesme kuvvetlerini önceden tahmin edilmesi sağlanabilir.

Binali ve arkadaşları savunma sanayide zırh ve vinç sistemlerinde kullanılan S960QL çeliğinin işlenebilirliğini fiziksel deneyler ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile incelemişlerdir (Binali, Yıldız et al. 2024). İşlenebilirlik deneyleri CNC dik işleme tezgâhında TiAlN kaplamalı kesici takımla gerçekleşmiştir. ANOVA ve Taguchi L9 ortogonal dizin ile çıkış parametrelerinin analizi yapılmıştır. FEM için AdvantEdge yazılımı tercih edilerek Johnson–Cook malzeme modeli tanımlanmıştır. ANOVA sonuçlarına göre bütün eksenlerdeki kuvvetleri en fazla etkileyen parametre eksenel kesme derinliği olmuştur. Güç tüketimi ve tork için en etkili parametrenin ise yan kesme derinliğinin olduğu görülmüştür. Bulgularda sıcaklık için en önemli faktörün ilerleme olduğu tespit edilmiştir. FEM sonuçları ile fiziksel deneyler arasında %10 dan daha az sapmaların olması bu yöntemi güvenilir kılmıştır. Bu sayede maliyet ve zaman açısından tasarruf edilebileceği belirtilmiştir. 0.2 yan kesme derinliği, 2 mm eksenel kesme derinliği, 110 mm/dak kesme hızı ve 0.08 mm/diş ile optimum parametreler bu çalışma sayesinde elde edilmiştir.

Akdeniz ve arkadaşları Al 7075-T6 alaşımına giriş ve çıkış parametrelerine bağlı olarak işlenebilirlik deneyleri yapmışlardır (Akdeniz, Bozdemir et al. 2024). Giriş parametreleri kesme hızı, ilerleme, yan

kesme derinliği ve takım tutucu olarak belirlenmiştir. Bu giriş parametrelerine bağlı olarak Taguchi L27 yöntemi kullanarak yüzey pürüzlülüğüne ve işleme hassasiyetine etkisini varyans analizi (ANOVA) ile incelemişlerdir. Takım tutucuları üç farklı olmak üzere mekanik, termal (şirink) ve hidrolik tutucu seçilmiştir. Yapılan deneyler Micro Dynamics Mega 40V CNC frezeleme tezgâhında gerçekleştirilmiştir. ANOVA sonuçlarında yan kesme derinliğinin, yüzey pürüzlülüğü ve işleme hassasiyetine etkisinin sırasıyla % 37,7 ve % 36,1 oranlarında olduğu tespit edilmiştir. Frezeleme işleminde düşük bir yüzey pürüzlük değeri elde edilebilmesi için yüksek devir hızı ile düşük kesme derinliği seçilmesi tavsiye edilmiştir. Takım tutucu tiplerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin az olduğu fakat işleme hassasiyetine etkisinin daha fazla etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.

Krishnaraj ve arkadaşları Ti-6Al-4V alaşımını karbür uçlu kesici takım kullanarak yüksek hızlarda uç frezeleme işlemi uygulayarak araştırmışlardır (Krishnaraj, Samsudeensadham et al. 2014). Kesme parametreleri üç farklı kesme hızı (120, 150, 180 m/dak), üç farklı ilerleme miktarı (0.05, 0.075, 0.1 mm/diş) ve üç farklı talaş derinliği (0.5, 0.75, 1 mm) olmuştur. İşlenebilirlik deneyleri Taguchi deney tasarım modeli ile yapılmıştır. Kesme parametrelerine bağlı olarak kesme kuvvetleri, sıcaklık ve yüzey pürüzlük değerleri incelenmiştir. Sonuçlarda kesme kuvvetlerine ilk olarak en çok etkiyi talaş derinliğinin, ikinci olarak ilerleme miktarının yaptığı belirtilmiştir. Genel olarak kesme hızının artması ile sıcaklıkta artış meydana gelmektedir. Fakat talaş derinliği 0.75 mm olduğunda 0.5 mm ye göre daha düşük sıcaklık değeri ortaya koymuştur. Yüzey pürüzlülüğü için ilerleme miktarının etkisinin kesme hızı ve talaş derinliği kadar etkili bir parametre olmadığı sonucuna varılmıştır. Yüksek hızlı işleme için 150 m/dak kesme hızı, 0.75 mm talaş derinliği ve 0.075 mm/diş ilerleme oranı en uygun parametrelerdir. Yapılan literatür taramasında frezeleme işleminde kullanılan malzemeler, kesici takımlar ve yöntemler aşağıda Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Frezeleme işlemine ait literatür verileri

Çalışma	Malzeme	Kesici Takım	Yöntem
(Hekimoğlu, Bayraktar et al. 2018)	Al-35Zn	Kaplamasız ve TiAlN kaplamalı karbür	SEM analiz
(Luo, Huang et al. 2025)	PCrNi3MoV A	10 mm karbür freze	Modelleme & ANOVA
(Binali, Yıldız et al. 2024)	S960QL	TiAlN kaplamalı	FEM (AdvantEdge), Taguchi
(Akdeniz, Bozdemir et al. 2024)	Al 7075-T6	Mekanik, şirink, hidrolik tutucu	Taguchi L27, ANOVA
(Krishnaraj, Samsudeensadham et al. 2014)	Ti-6Al-4V	Karbür	Taguchi

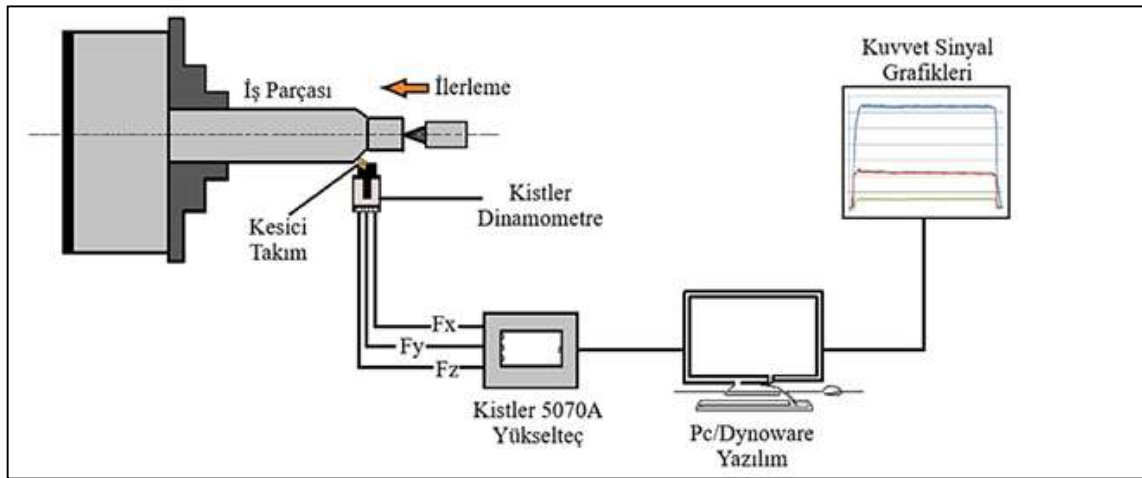
Tornalama

Tornalama iş parçası malzemesinin x-z ekseninde her bir dönüşünde kalem adı verilen kesici takımın iş parçası eksenine paralel eksende hareket etmesiyle malzeme yüzeyinden talaş kaldırma işlemidir (Demirpolat, Binali et al. 2023). Bu yöntem savunma sanayide kullanılan mil, şaft, rötör gibi önemli bileşenlerin geometrik doğruluğunu sağlamakta ve yüzey kalitesini yüksek standartlarda olmasını ve mukavemet ve güvenilirlik sağlamaktadır. Tornalama işlemiyle ilgili literatür çalışmaları aşağıda verilmiştir.

Yaşar ve arkadaşları 17-4 PH ve 15-5 PH paslanmaz çeliklerinin farklı kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini tornalama ile işleme yöntemiyle incelemişlerdir (Yaşar 2020). Tornalama yönteminde PVD ve CVD kaplama yapılmış kesici takımları tercih etmişlerdir. Deneyin giriş parametreleri olarak dört farklı kesme hızı, dört farklı ilerleme hızı ve dört farklı kesme derinliği kullanılmıştır. Deneylerde zaman ve maliyet tasarrufu için Taguchi karma seviye deney tasarımı metodu kullanılmıştır. Çıkış parametreleri olan kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüklerini ANOVA (Varyans

analizi) ile incelenmiştir. Yapılan bu analizler sonucunda kesme kuvveti için en etkili parametre kesme derinliği, yüzey pürüzlülüğü için ilerleme oranı olmuştur. Kullanılan kesici takımlar arasında optimum kesme şartlarında PVD kaplamalı takımın daha uygun olduğu anlaşılmıştır.

Hekimoğlu ve bayraktar kokil kalıba döküm yöntemiyle üretilen Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımını tornalama ile işlemişlerdir (Hekimoğlu and Bayraktar 2023). Tornalama işlemleri Johnford TC-35 marka CNC torna tezgahında kaplamasız karbür kesici takımlarla yapılmıştır. Kesme parametreleri kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliğidir. Talaş derinliğini sabit tutarak kesme hızları (250, 400 ve 550 m/dak) ile ilerleme (0,05; 0,15 ve 0,25 mm/dev) kullanılmıştır. Yüzey pürüzlüğü ölçümü için yüzeyden her bir deney için beşer ölçüm alınarak yapılmıştır. Bu sayede aritmetik ve nihai ortalama yüzey pürüzlükleri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlük ölçümleri haricinde deneyde oluşan kesme kuvvetleri de ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda ilerlemenin artmasıyla beraber ortalama yüzey pürüzlüğü ve yığıntı talaş oluşumunun arttığı, kesme hızının artmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. En küçük kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü değeri ve yığıntı talaş oluşumu için m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızının uygun olduğu belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel düzenek Şekil 2’de yer almaktadır.



Şekil 2. CNC torna tezgâhı ve verilerin toplanmasını şematik olarak gösteren bir örnek (Hekimoğlu, Bayraktar et al. 2018)

Morampudi ve arkadaşları AA 6061 malzemesine farklı oranlarda (%5, %10, %15) ilmenit (FeTiO_3) eklemiş ve metal matris kompozitleri (MMC) karıştırılmalı döküm yöntemiyle üretmişlerdir (Morampudi, Ramana et al. 2021). Kompozitlerin yapılarını incelemek için SEM (Taramalı elektron mikroskobu) ve optik mikroskoptan faydalanmışlardır. İşlenebilirlik deneyleri CNC torna tezgahında 360 ve 560 rpm hızlarında ve 0.14, 0.16, 0.20 mm/rev ilerleme oranlarında yapılmıştır. %10 ve %15 ilmenit takviyeli kompozitlerde kesme kuvvetlerinin hızın artmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Kesme kuvveti 0.16 mm/rev ilerleme oranı ile en düşük değeri görmüştür. %5 takviyeli kompozitler için kesme kuvvetinin değişken olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü için hızın artmasıyla beraber yüzey pürüzlük değerinin azaldığı fakat ilerleme oranının artmasıyla beraber bu değer arttığı tespit edilmiştir.

Basmacı çalışmasında AISI 316 Ti paslanmaz çeliğine tornalama işlemi uygulayarak optimum kesme parametrelerini bulmayı hedeflemiştir (Basmacı 2018). Deneylerde kuru MQL ve CO₂ işleme parametreleri değişken olarak tercih edilmiştir. Kesme hızı sabit tutularak üç farklı ilerleme oranı (0.1, 0.2 ve 0.3 mm/dev) ile üç farklı kesme derinliği (0.5, 1 ve 1.5 mm) kullanılmıştır. Taguchi deney metodu kullanılarak az sayıda deneyle optimum sonuçlara ulaşılmıştır. Gri İlişki analizi yapılarak en iyi parametre seçimleri belirlenmiştir. En düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü nün elde edilebilmesi için kesme derinliği ve ilerleme oranı minimum seviyede tutulmalıdır. En uygun GRA değeri 0,994 olarak 1’ nolu deneyde gözlemlenmiştir.

Al1070 matrisli TiB₂ takviyeli kompozit ile çalışan Pul tornalama işlemi yaparak kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemiştir (Pul 2020). Tornalama işlemlerinden önce Al1070 ağırlıkça %2, %4 ve %8 TiB₂ takviye ederek kompozitler üretmiştir. İşlenebilirlik deneylerinde sementit karbür (SK), kaplamalı sementit karbür (KSK) ve kübik bor nitrür (KBN) olmak üzere üç farklı takım kullanmıştır. Tornalama işlemleri 1 mm sabit talaş derinliğinde 100, 200 ve 300 m/dak kesme hızları ile 0,10- 0,15- 0,25 mm/dev ilerleme oranlarında yapılmıştır. Kesme hızının artması kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinde azalmaya neden olmuş ama TiB₂ takviyesindeki artış bu iki parametre

değerlerini de arttırmıştır. En düşük kesme kuvvetine KSK takım ile 0,10 mm/dev ilerleme ve 300 m/dak kesme hızında %2 TiB₂ takviyeli kompozit numune de 74 N olarak ölçülmüştür. En küçük yüzey pürüzlülüğü %2 TiB₂ takviyeli kompozit numunede, 0,10 mm/dev ilerleme ve 100 m/dak kesme hızında SK takım ile işlenerek 0,63 µm elde edilmiştir. Yüksek ilerleme ve kesme hızlarında KBN takım ile işlendiğinde daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Düşük ilerleme ve kesme hızlarında ise SK takımlarda daha düşük yüzey pürüzlük değerlerine ulaşılmıştır. İşlenebilirlik açısından SK takımla işlenen numunelerde daha iyi sonuçlara ulaşıldığı ifade edilmiştir.

Tornalama ile ilgili literatür taramaları incelendiğinde farklı malzemeler, kesici takım tipleri ve uygulanan yöntemler aşağıda belirtilen Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Tornalama işlemine ait literatür verileri

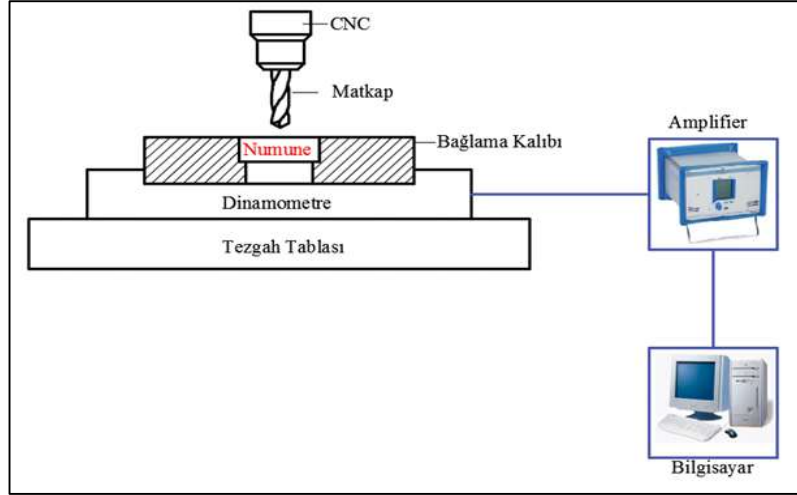
Çalışma	Malzeme	Kesici Takım	Yöntem
(Yaşar 2020)	17-4 PH & 15-5 PH çelik	PVD & CVD kaplamalı	Taguchi, ANOVA
(Hekimoğlu and Bayraktar 2023)	Al-9Si-0.1Sr-0.6Mg	Karbür	Deneysel
(Morampudi, Ramana et al. 2021)	AA 6061 + %5–15 FeTiO ₃	CNC takım	SEM, deney
(Basmacı 2018)	AISI 316Ti	Kuru, MQL, CO ₂ koşulları	Taguchi, GRA
(Pul 2020)	Al1070 + %2–8 TiB ₂	SK, KSK, KBN	Deneysel

Delik Delme

Talaşlı imalat üretim süreçlerinden biri olan delik delme işlemi matkap adı verilen kesici takımla iş parçasından talaş kaldırmak için tasarlanmış çap ve derinlikte derinlikler açılması sağlayan mekanik işlemdir (Makhesana, Patel et al. 2024). İşlem esnasında kesici takım dönme ve ilerleme hareketi gerçekleştirir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Altınsoy ve Ülgen çalışmalarında delme ve frezeleme işlemleri yaparak Ti6Al4V alaşımının işlenebilirliğini incelemişlerdir (Altınsoy and Ülgen 2025). Ti6Al4V alaşımı savunma sanayide oldukça yaygın kullanılmaktadır. Ti6Al4V alaşımı yüksek sertlik ve düşük ısı iletkenlik gibi özelliklerden dolayı işlenmesi zor bir malzemedir. Bu çalışmada, AGMA VMC Serisi, VMC-115, X, Y ve Z eksenli, FANUC Serisi 18i-MB kontrolü 1-10,000 mm/dak kesme ilerlemesine sahip dik işleme tezgâhı kullanılmıştır. Frezeleme yöntemi olarak alın frezeleme işlemi tercih edilmiştir. Bu işlem APXT-1003-PDR freze ucu ile yapılmıştır. Frezeleme işlemleri kuru ve kesme sıvısı kullanıldığı iki farklı ortamda yapılmıştır. Bu işlemlerde iki farklı kesme hızı kullanılmış olup ilerleme hızı ve talaş derinliği sabit tutulmuştur. Kullanılan kesme hızları 50 m/dak ve 100 m/dak, ilerleme hızı 0,25 mm/dev ve kesme derinliği 0,4 mm olmuştur. Delme işlemi için 3 parça kullanılmış ve her bir parçaya üçer tane olmak üzere kör delikler açılmıştır. Delme işleminde de frezeleme de olduğu gibi soğutucu sıvı kullanılmıştır. Soğutma sıvısı olarak %5 Estra 320 mikroemülsiyon metal işleme sıvısı ve %95 su karışımı tercih edilmiştir. Delme işlemi sonrası oluşan talaşlar incelendiğinde kuru kesme ortamında elde edilen burğu talaş olduğu görülmektedir. Burğu talaş, boşaltma kanalında sıkışmaya sebep olacağından istenilen bir durum değildir. Öte yandan soğutucu sıvı kullanılan kesme ortamında kabul edilebilir sınırın altında olan helisel talaş tipi elde edilmiştir. Bu delme işleminde matkap çapının kesme sıvısı kadar önem taşımadığını göstermektedir. Frezeleme sonrasında oluşan talaşlar için genel olarak kesme hızının, kesme sıvısına oranla daha fazla etkisi olduğu ifade edilmiştir. Frezeleme işleminde kuru kesme ortamında yapılan deneyler sonrasında kesici takımda kırılmalar olduğu gözlemlenmiştir. Soğutucu sıvı kullanılan deneyler ise sadece yan yüzey aşınmaları meydana gelmiştir. Delme işleminde ise her iki ortamda da sıcaklık ve basınçtan kaynaklı aşınmalar ortaya çıkmıştır.

Okay ve Islak çalışmalarında alüminyum matrisli bor karbür (B4C) malzemesini toz metalürjisi yöntemiyle üreterek delik delme işlemi uygulamışlardır (Okay and Islak 2021). 5 mm çaplı HSS matkap kullanarak 20-30-40-50 m/dak kesme hızlarında ve 0.1-0.2-0.3-0.4 mm/dev ilerleme miktarlarında işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. B4C takviyesi ile ilerleme kuvveti ve momentte düşüş görülmüş ama yüzey kalitesinde artma gözlemlenmiştir. İlerleme miktarının yükselmesiyle kuvvet ve moment değerlerinde artış olmuştur. İlerleme kuvveti 20 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme miktarında B4C takviyeli malzemede en düşük değerini alarak 180 N ölçülmüştür. İlerleme miktarının artışı yüzey pürüzlük değerini arttırmıştır. Kesme hızındaki artışla da yüzey pürüzlük değeri azalmıştır. Takviyeli numunelere bakıldığında yüzey kalitesinde bir artış gösterdiği sonucuna varılmıştır. En küçük yüzey pürüzlüğü değeri en düşük ilerleme miktarı ve en yüksek kesme hızında takviyeli numunede 2.448 μm elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan deneysel düzeneğin şematik gösterimi şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Matkap tezgâhı (Okay and Islak 2021)

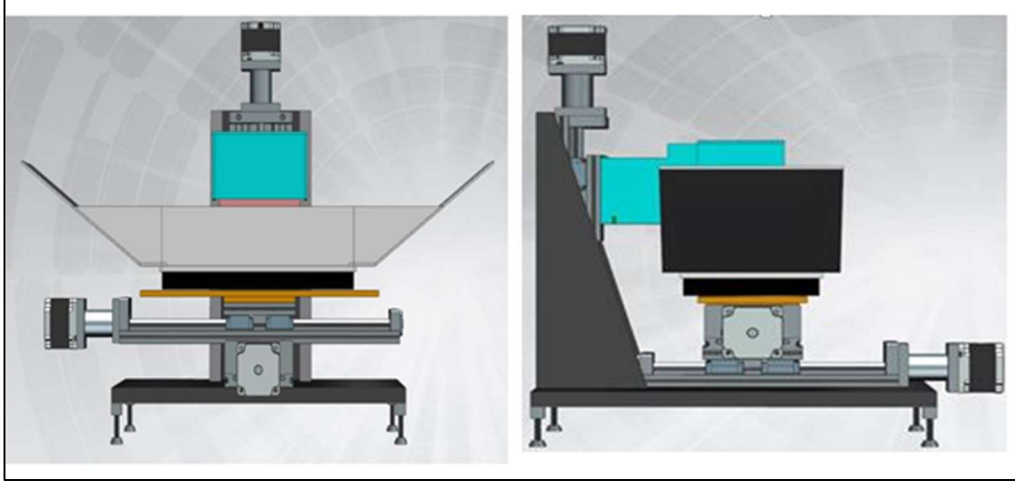
Çalışmalarında havacılık sınıfı karbon fiber takviyeli epoksi matrisi kompoziti (CFRP) inceleyen Bolat ve arkadaşları matkap tipleri, matkap çapı, besleme ve kesme hızlarına bağlı olarak kuvvet ve pürüzlük ölçümleri yapmışlardır (Bolat, Karakılınç et al. 2023). Matkap tipleri olarak 120° ve 138° burğu matkap, 90° Brad matkap kullanılmıştır. 3 ve 5 mm matkap çapları ile 0.05, 0.1, 0.2 mm/devir besleme hızları tercih edilmiştir. Üç farklı kesme hızı kullanılmış olup bunlar 15, 30, 45 m/dak olmuştur. Deney sonuçlarına göre itme kuvveti için en etkili parametrenin besleme hızı olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek kuvvet değeri Brad matkap (90°) ile ölçülmüştür. En düşük kuvvet değeri ise 120° burğu matkap ile elde edilmiştir. Çapın artmasıyla kuvvetin arttığı söylenebilir. Kesme hızı ve besleme hızının artmasıyla yüzey kalitesinde azalma gözlemlenmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğüne 120° burğu matkap ile en yüksek Brad matkap ile ulaşılmıştır. Literatür taramaları incelendiğinde delik delme işlemiyle ilgili malzeme türleri, matkap tipi, kesme ortamı ve takım aşınmasının Tablo 3'te verileri verilmiştir.

Tablo 3. Literatürde delme üzerine yapılan çalışmalar

Çalışma	Malzeme	Matkap Tipi	Kesme Ortamı	Yöntem
(Altınsoy and Üllen 2025)	Ti6Al4V	HSS matkap, APXT freze	Kuru & soğutmalı	Frezeleme ve delik delme deneyleri
(Okay and Islak 2021)	Al-B4C MMC	5 mm HSS	Kuru	Delme deneyleri
(Bolat, Karakılınç et al. 2023)	CFRP	90° Brad, 120°–138° burğu	Kuru	Delme deneyleri

Taşlama

Taşılama malzemelerin yüzeylerini pürüzsüzleştirmek, şekillendirmek ve yüzeydeki düzensizlikleri gidermek için yapılan son işlem olarak ön plana çıkmaktadır. İş parçasına frezeleme ve tornalama işlemlerinden sonra pürüzsüz yüzey sağlamak ve son geometriyi formunu sağlamak için uygulanır. Taşılama işleminde çok düşük miktarlarda talaş kaldırma işlemi gerçekleştirildiği için aynı zamanda bitirme işlemi olarak da kabul edilmektedir. Taşılama işlemine ait tezgâh şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Taşılama tezgâhı (Yüksel, Kılınç et al. 2019)

Özay ve arkadaşları 1040 orta karbonlu çeliğinin silindirik parçalarda teğetsel taşlamayla işlenmesinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmışlardır (Özay, Ballıkaya et al.). Araştırmada talaş derinliği, talaş kaldırma devri ve iş parçasının dönüş hızı farklı parametreler ele alınarak değerlendirilmiştir ancak ilerleme hızı sabit tutulmuştur. Deneyler L9 tasarımına göre yapılmıştır ve sonuçlar S/N formantında hesaplanarak parametre açısından en uygun seviye belirlenmiştir. Buna ek olarak varyans analizi (ANOVA) ile her parametrenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi %'lik oranla hesaplanmıştır. Araştırma sonucunda yüzey pürüzlülüğünde takım devri değişkeninin kritik bir öneme sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Ballıkaya ve arkadaşları yaptıkları çalışmada silindirik taşılama işlemiyle AISI 304 paslanmaz çeliğini işleyerek kesici takımda meydana gelen titreşimleri incelemiştir (Ballıkaya, Altuğ et al.). Deneysel çalışma ilerleme hızı, talaş derinliği, kesme ve iş parçası devri değişkenleri farklı seviyelerde ele alınarak yapılmıştır. Parametreleri değerlendirmek için Taguchi yöntemi ve L18 deneysel planlama yöntemi kullanılmıştır. Varyans analizi (ANOVA) ve deneysel veriler sonucuna göre değişkenlerin titreşim davranışında kayda değer etkiye sahip olduğu görülmüştür hatta iş parçası değişkeninin %35 oranıyla etkili değişken olduğu gözlemlenmiştir.

Değerlendirilen literatür taramalarına göre taşılama işlemine yönelik malzeme, yöntem ve analiz Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Taşılama işlemine ait literatür verileri

Çalışma	Malzeme	Yöntem	Analiz
(Özay, Ballıkaya et al.)	Ç1040 çeliği	Silindirik taşılama	ANOVA, S/N oranı
(Ballıkaya, Altuğ et al.)	304 çeliği	Silindirik taşılama	Taguchi L18, ANOVA

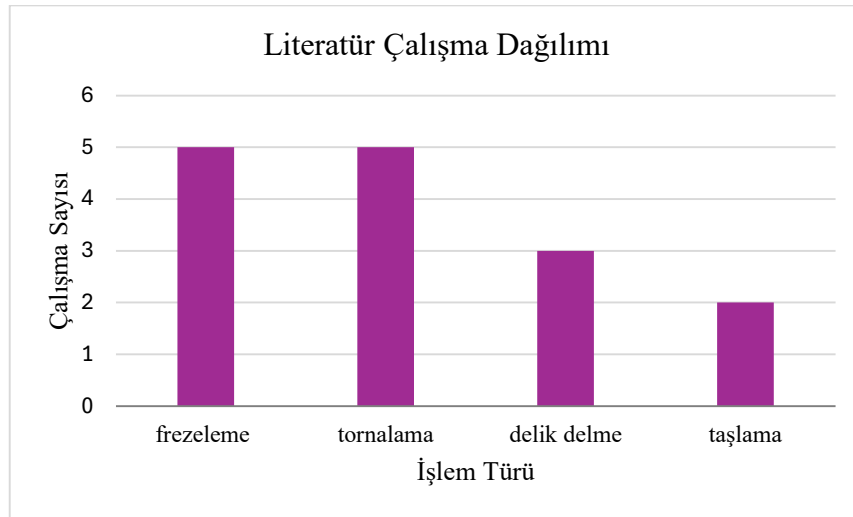
SONUÇLAR

İncelenen literatür çalışmalarından elde edilen verilerin daha açık biçimde değerlendirilmesi için literatür incelemelerinden ortaya çıkan bulgular Şekil 5,6 ve 7’de görselleştirilmiştir.

Şekil 5’in grafik verilerine bakıldığında yaptığımız literatür taramalarında 5 frezeleme, 5 tornalama işlemini 3 delik delme ve 2 taşlama işlemi takip etmektedir. Frezeleme ve tornalama işleminin diğer çalışmalara kıyasla ön plana çıktığı görülmektedir. Dağılım değerlendirildiğinde literatürde frezeleme ve tornalamanın yoğun olduğu delik delme ve taşlama işleminin daha az tercih edildiği görülmektedir. Bu durum yapılacak olan çalışmalar için literatür araştırmaların eksik yönünü gösterip yönlendirme niteliği taşımaktadır.

Malzeme dağılımı grafiği incelendiğinde %29’luk oranlarıyla alüminyum alaşımları ve ultra yüksek mukavemetli çelikler literatürde en çok incelenen malzemeler olup araştırmaların dayanım arttırmak ve hafifliği sağlamak için bu malzemelere yoğun olarak değindiği gözlemlenmiştir. Bu durumu malzemelerin üretim süreçlerinde sık tercih edilmesi ve işlenebilirlik özellikleriyle bağdaştırabiliriz. Kompozit ve titanyum esaslı malzemeler %12’lik oranla ortalama seviyeyi temsil edip havacılık ve savunma sanayide kritik rolleri olması nedeniyle literatürde öne çıkmaktadır. Ancak %6’lık oranlara sahip paslanmaz çelikler, magnezyum ve nikel bazlı süper alaşımlar için yapılan çalışmalar daha sınırlı kalmaktadır. Grafikte verilen dağılım incelendiğinde bazı malzeme gruplarının daha çok incelendiği bazılarının ise daha sınırlı incelendiği görülmektedir. Düşük oranlı malzemeler ileride gerçekleştirilecek çalışmalar için araştırma fırsatı sunmaktadır.

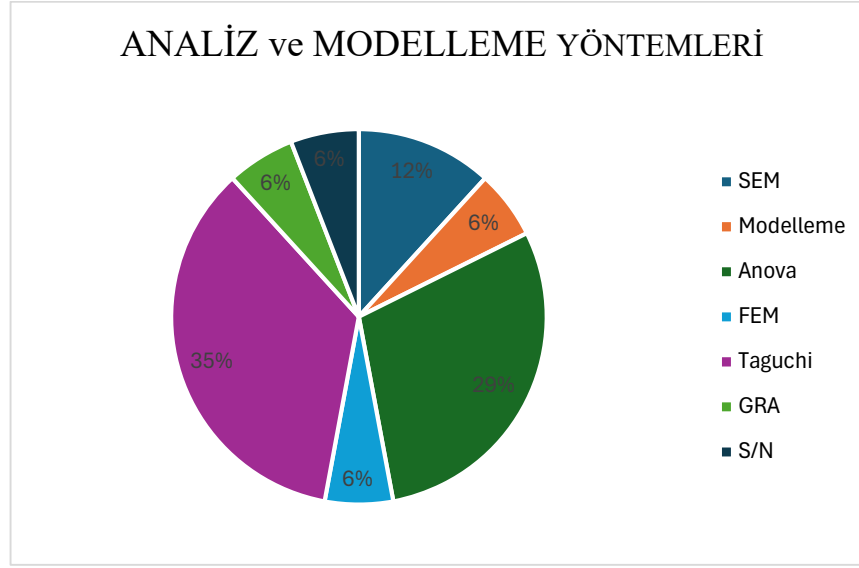
Literatür çalışmalarında kullanılan analiz ve modelleme yöntemleri şekil 7’de şekilde gösterilmiştir. İncelenen makalelerde en fazla taguchi deney tasarımı %33 oranla kullanılmıştır. En az kullanılan tasarım ve modelleme yöntemleri birden fazla ve eşit olmakla beraber %6 değeri ile modelleme, GRA, FEM ve S/N yöntemleridir.



Şekil 5. Literatürde kullanılan işleme yöntemleri ve adetleri



Şekil 6. Literatürde kullanılan malzemelerin dağılımı



Şekil 7. Literatürde kullanılan analiz ve modelleme yöntemleri

SONUÇ

- Savunma sanayi için yapılan çalışmalarda frezeleme ve tornalama işlemi en çok kullanılan talaşlı imalat yöntemidir. Bu işlemler karmaşık şekiller ve yüksek hassasiyet gerektiren toleranslar için yapılmaktadır.
- Araştırmalarda performans iyileştirmesi sürecinde araştırmacılara kolaylık sağladığı için çoğunlukla sayısal ve istatistiksel modelleme tekniklerinden Taguchi ve ANOVA kullanılmıştır.
- Talaşlı imalat süreçlerinde kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık, takım aşınması çıktıların üzerinde talaş derinliği, kesme ve ilerleme hızının belirgin bir etkisi olduğu görülmektedir.
- Yüzey pürüzlülüğü frezeleme ve tornalama işlemleri için öne çıkarken delik delme ve taşlama işlemlerinde yüzey kalitesi öne çıkmaktadır.
- Taguchi deney tasarım modeli literatürde en çok kullanılan yöntem olmuştur. Bu zaman ve maliyet tasarrufu açısından modelin tercih edilmesiyle açıklanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Akdeniz, E., et al. (2024). "AL 7075-T6 Frezeleme Operasyonunda Kesme Parametrelerinin Ve Takım Tutucunun Yüzey Pürüzlülüğüne Ve İşleme Hassasiyetine Etkisinin İncelenmesi." Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi **9**(3): 535-543.
- [2] Altınsoy, Ş. and N. B. Üllen (2025). "Ti6Al4V Alaşımının Delme ve Frezeleme Proseslerinde İşleme Parametrelerinin Talaş Formları, Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesici Takımların Aşınması Üzerine Etkileri." Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi **37**(1): 233-249.
- [3] Ballıkaya, H., et al. "Investigation of vibration in cutting tool in machining with AISI 304 stainless steel tangential cylindrical grinding method."
- [4] Basmacı, G. (2018). "Optimization of processing parameters of AISI 316 Ti stainless steels." Academic Platform Journal of Engineering and Science **6**(3-6): 1-7.
- [5] Binali, R. (2024). "Experimental and machine learning comparison for measurement the machinability of nickel based alloy in pursuit of sustainability." Measurement **236**: 115142.
- [6] Binali, R., et al. (2021). "S960QL yapı çeliğinin işlenebilirliğinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi." Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi(31): 85-91.
- [7] Binali, R., et al. (2024). "Finite element analysis and statistical investigation of S960ql structure steel machinability with milling method." Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering **46**(5): 260.

-
- [8] Bolat, Ç., et al. (2023). "Effect of drilling parameters and tool geometry on the thrust force and surface roughness of aerospace grade laminate composites." Micromachines **14**(7): 1427.
- [9] Demirpolat, H., et al. (2023). "Comparison of tool wear, surface roughness, cutting forces, tool tip temperature, and chip shape during sustainable turning of bearing steel." Materials **16**(12): 4408.
- [10] Hekimoğlu, A. P. and Ş. Bayraktar (2023). "Al-9Si-0.1 Sr-0.6 Mg Alaşımının Tornalanmasında İşlenebilirlik Karakteristiklerinin Araştırılması." International Journal of Engineering Research and Development **15**(2): 517-525.
- [11] Hekimoğlu, A. P., et al. (2018). Kesme Hızı ve İlerlemenin Al-35Zn Alaşımının İşlenebilirliğine Etkisinin İncelenmesi. SETSCI-Conference Proceedings, SETSCI-Conference Proceedings.
- [12] Krishnaraj, V., et al. (2014). "A study on high speed end milling of titanium alloy." Procedia Engineering **97**: 251-257.
- [13] Luo, Z., et al. (2025). Research on high-speed milling of high-strength steel. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing.
- [14] Makhesana, M. A., et al. (2024). "Evaluation of drilling and hole quality characteristics in green machining aluminium alloys: A new approach towards green machining." Journal of Manufacturing Processes **129**: 176-186.
- [15] Morampudi, P., et al. (2021). "The investigation of machinability and surface properties of aluminium alloy matrix composites." Journal of Engineering and Technological Sciences **53**(4): 210412.
- [16] Okay, F. and S. Islak (2021). "Alüminyum matrisli bor karbür takviyeli kompozit malzemeye uygulanan delik delme işleminde kesme parametrelerinin etkileri." İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları **2**(1): 14-22.
- [17] Özay, Ç., et al. "Ç1040 malzemesinin teğetsel silindirik taşlama yöntemi ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün araştırılması."
- [18] Pul, M. (2020). "Al 1070/TiB2 Kompozitlerin Tornalanmasında TiB2 Takviye Miktarının Esas Kesme Kuvveti Ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi." Duzce University Journal of Science and Technology **8**(1): 754-764.
- [19] Salur, E., et al. (2025). "Effect of Cooling/Lubrication Conditions on Machining Performance: An Experimental Investigation of 1040 Steel Under Dry, MQL, and Nano-MQL Environments." Materials **18**(17): 4063.
- [20] Yaşar, S. A. (2020). "17-4 PH ve 15-5 PH paslanmaz çeliklerinin tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin araştırılması." Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi **10**(1): 71-81.
- [21] Yüksel, M., et al. (2019). "Taşınabilir Hafif Yüzey Taşlama Makinasının Tasarım ve İmalatı." Makina Tasarım ve İmalat Dergisi **17**(1): 9-15.